

論文目録

報告番号	乙 工 第 30 号	氏 名	堀 井 克 章
学位論文題目	永久埋設型枠用連続繊維補強ポリマーセメントモルタルに関する研究		
論文の目次			
第 1 章 序 論			
第 2 章 永久埋設型枠製品の開発動向			
第 3 章 モルタル改質用ポリマー混和材料の検討			
第 4 章 モルタル補強用連続繊維メッシュの検討			
第 5 章 永久埋設型枠用モルタルの促進養生効果			
第 6 章 モルタル型枠と現場打ちコンクリートとの一体性			
第 7 章 モルタル型枠を埋設した鉄筋コンクリートはりの性状			
第 8 章 結 論			
参考文献			
主論文			
1)連続繊維ネットとポリマー混和材を用いたモルタル板の諸性状，堀井克章・河野 清・佐々木啓次，コンクリート工学年次論文報告集（Vol. 15，No.1），1993年（6月）.			
2)ガラス繊維とポリマーを用いた埋設型わくの基礎的性質とコンクリートとの付着性状，川口修宏・森内誠司・河野 清・堀井克章，セメント・コンクリート論文集（No. 48），1994年（12月）.			
3)各種の砂を用いた永久型枠用繊維補強ポリマーセメントモルタルの性状，堀井克章・河野 清・筒崎 卓，コンクリート工学年次論文報告集（Vol. 17），1995年（6月）.			
4)Experimental Studies on Various Fiber Nets Polymer Dispersions and Aggregates Used for High-Durability Casting Mortar Formwork（高耐久性モルタル埋設型枠に使用する各種の繊維ネット，ポリマー分散材および骨材に関する実験的検討），K. Horii・K. Kohno・T. Tsutsuzaki，Proceedings of the Third Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction（Johor Bahru，Malaysia），1996（June）.			
副論文			
1)Use of By-Products for Glass Fiber Reinforced Concrete（ガラス繊維補強コンクリートに対する産業副産物の利用），K. Kohno・K. Horii，Transactions of the Japan Concrete Institute（Vol. 7），1985（12月）.			
2)Mixing Methods and Properties of Silica Fume Concrete for Factory Products（製品用シリカフュームコンクリートの練りまぜ方法と諸性状），K. Horii・K. Kohno・K. Amo，Transactions of the Japan Concrete Institute（Vol. 9），1987（12月）.			

論文内容要旨

報告番号	乙 工 第 30 号	氏 名	堀 井 克 章
学位論文題目 永久埋設型枠用連続繊維補強ポリマーセメントモルタルに関する研究			
内容要旨			
<p>本研究は、地球環境問題となっている熱帯材合板からのコンクリート用型枠材の転換、工場製品の導入や型枠工事、養生、表面仕上げなどの簡素化による現場施工の合理化、建設廃材や仮設材の削減、ち密でひびわれが生じにくく、着色や模様化も可能な表層を設けることによるコンクリート構造物の耐久性や美観の向上、環境資源である天然砂の保全や産業副産物の有効利用などを目的とした高機能永久埋設型枠の開発に関するものである。</p> <p>永久埋設型枠は、型枠としての機能後も取り外さずにコンクリート構造部材の表層に埋設し、構造物の耐久性を高めるもので、本研究では、連続繊維メッシュ補強材と水性ポリマーディスパージョン改質材などの比較的新しい素材やフェロニッケルスラグ砂などの副産物をセメントモルタルに利用し、経済的で成形しやすく、高機能で汎用性に富む永久埋設型枠製品を製造し、これを従来からの現場打ちコンクリートと複合化させた新しい工法として定着させるための学術的な基礎資料を得るための実験を行って考察を加えている。</p> <p>実験では、様々なポリマーやメッシュおよび数種のセメントや骨材を使用したモルタルの諸性状を調査するとともに、モルタルの加熱による促進養生効果、現場打ちコンクリートと接合する面に色々な突起を設けたモルタルと現場打ちコンクリートとの一体性、モルタル型枠を埋設した小型の鉄筋コンクリートはりの載荷性状などの検討を行っている。</p> <p>本研究より得られた結果を以下に要約する。鉄筋コンクリート構造部材に埋設する永久型枠には、SA系水性ポリマーディスパージョン、フェロニッケルスラグ砂、早強ポルトランドセメント、界面活性型消泡剤などを使用した高流動モルタルを、エポキシ樹脂による熱圧含浸処理あるいはPAE系水性ポリマーディスパージョンによる簡便な浸漬乾燥処理を施し、耐アルカリ性や結合力を高めたガラス繊維メッシュで補強するのが良い。これらの材料を用いることで、モルタルの諸物性、耐久性、美観などが大きく改善される。このようなモルタルでは、湿潤養生後の乾燥養生で品質が向上し、早期材齢での強度を改善するには、長期強度や耐久性に一部問題があるものの、蒸気養生や熱乾燥養生などの促進養生が有効となる。メッシュやモルタルの性状評価には、物性や耐久性などに関する従来の試験に加えて走査電子顕微鏡観察などが有効となる。砕砂や碎石を埋込んだり、溝状や千鳥状の凹凸を転写したり、ワイヤブラシがけなどで接合面を処理したモルタル板をコンクリートに埋設すると、接合面に2面せん断応力や割裂引張応力が作用しても比較的高い耐力を保持できる。小断面の鉄筋コンクリートはりは、接合面を砕砂で処理した連続繊維補強ポリマーセメントモルタルの埋設で、良好な一体性が確保でき、ひびわれ発生荷重が上昇してひびわれ幅が抑制され、曲げ耐力、せん断耐力および靱性の改善効果もある。</p> <p>耐力、遮へい性、美観などに優れた連続繊維補強ポリマーセメントモルタルは、永久埋設型枠にとどまらず、補修・補強材、道路・高層建築付帯施設、修景材、貯蔵・遮へい施設、各種の建設資材などにも適用可能となる。永久埋設型枠は、コストや製造法、建設現場での組立てや接合などの技術、新たな設計法の確立など、実用化には解決すべき問題も多く、その形式にも様々なものが考えられる。本研究と相前後して開発された個々に特徴のあるいくつかの型枠が、世紀の事業である本州四国連絡橋などで試験施工されているように、永久埋設型枠工法は、注目されつつある建設技術であり、多方面で研究や施工の実績を蓄積し、設計法や施工法が標準化されることを期待する。</p>			

永久埋設型枠用連続繊維補強
ポリマーセメントモルタル
に関する研究

1996年9月

堀井克章

②

永久埋設型枠用連続繊維補強
ポリマーセメントモルタル
に関する研究

1996年9月

堀井克章

要 旨

本研究は、地球環境問題となっている熱帯材合板からのコンクリート用型枠材料の転換、工場製品の導入や型枠工事、養生、表面仕上げなどの簡素化による現場施工の合理化、建設廃材や仮設材の削減、ち密でひびわれが生じにくく、着色や模様化も可能な表層を設けることによるコンクリート構造物の耐久性や美観の向上、環境資源である天然砂の保全や産業副産物の有効利用などを目的とした高機能永久埋設型枠の開発に関するものである。

永久埋設型枠は、型枠としての機能後も取り外さずにコンクリート構造部材の表層に埋設し、構造物の耐久性を高めるもので、本研究では、連続繊維メッシュ補強材と水性ポリマーディスパージョン改質材などの比較的新しい素材やフェロニッケルスラグ砂などの副産物をセメントモルタルに利用し、経済的で成形しやすく、高機能で汎用性に富む永久埋設型枠製品を製造し、これを従来からの現場打ちコンクリートと複合化させた新しい工法として定着させるための学術的な基礎資料を得るため、次のような実験を行って考察を加えている。

実験では、様々なポリマーやメッシュ、および数種のセメントや骨材を使用したモルタルの諸性状を調査するとともに、モルタルの加熱による促進養生効果、現場打ちコンクリートとの接合面に色々な突起を設けたモルタルと現場打ちコンクリートとの一体性、モルタル型枠を埋設した小型の鉄筋コンクリートはりの載荷性状などの検討を行っている。

本研究より得られた結果を以下に要約する。鉄筋コンクリート構造部材に埋設する永久型枠には、スチレンアクリル系水性ポリマーディスパージョン、フェロニッケルスラグ砂、早強ポルトランドセメント、界面活性型消泡剤などを使用した高流動モルタルを、エポキシ樹脂による熱圧含浸処理あるいはポリアクリル酸エステル系水性ポリマーディスパージョンによる簡便な浸漬乾燥処理を施し、耐アルカリ性や結合力を高めたガラス繊維メッシュで補強するのが良い。これらの材料を用いることで、モルタルの諸物性、耐久性、美観などが大きく改善される。このようなモルタルでは、湿潤養生後の乾燥養生で品質が向上し、早期材齢強度を改善するには、長期強度や耐久性に一部問題があるものの、蒸気養生や熱乾燥養生などの促進養生が有効となる。メッシュやモルタルの性状評価には、物性や耐久性などに関する従来の試験に加えて走査電子顕微鏡観察などが有効となる。砕砂や砕石を埋込んだり、溝状や千鳥状の凹凸を転写したり、ワイヤブラシがけなどで接合面を処理したモルタル板をコンクリートに埋設すると、接合面に2面せん断応力や割裂引張応力が作用しても比較的高い耐力を保持できる。小断面の鉄筋コンクリートはりは、接合面を砕砂で処理した連続繊維補強ポリマーセメントモルタルの埋設で、良好な一体性が確保でき、ひびわれ発生荷重が上昇してひびわれ幅が抑制され、曲げ耐力、せん断耐力および靱性の改善効果もある。

耐荷力、遮へい性、美観などに優れた連続繊維補強ポリマーセメントモルタルは、永久埋設型枠にとどまらず、補修・補強材、道路・高層建築付帯施設、修景材、貯蔵・遮へい施設、各種の建設資材などにも適用可能となる。

永久埋設型枠は、コストや製造法、建設現場での組立てや接合などの技術、新たな設計法の確立など、実用化には解決すべき問題も多く、その形式にも様々なものが考えられる。本研究と相前後して開発された個々に特徴のあるいくつかの型枠が、世紀の事業である本州四国連絡橋などで試験施工されているように、永久埋設型枠工法は、注目されつつある建設技術であり、多方面で研究や施工の実績を蓄積し、設計法や施工法が標準化されることを期待する。

目 次

要 旨

第1章 序 論	1
1. 1 研究の背景	1
1. 2 研究の目的	5
1. 3 研究の概要	9
第2章 永久埋設型枠製品の開発動向	11
2. 1 工場製品と型枠	11
2. 2 埋設型枠製品	15
2. 3 高耐久性埋設型枠	19
第3章 モルタル改質用ポリマー混和材料の検討	28
3. 1 概説	28
3. 2 フレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリートの作製	31
3. 3 モルタルの空気連行性と流動性	35
3. 4 モルタルの材料分離性	40
3. 5 モルタルの物性	42
3. 6 モルタルの耐久性	48
3. 7 永久埋設型枠の美観対策	55
3. 8 総括	56
第4章 モルタル補強用連続繊維メッシュの検討	58
4. 1 概説	58
4. 2 繊維補強セメント系複合板の補強機構と繊維材料	60
4. 3 メッシュを使用したモルタルの物性	68
4. 4 メッシュの耐アルカリ性	84
4. 5 総括	90
第5章 永久型枠用モルタルの促進養生効果	91
5. 1 概説	91
5. 2 蒸気養生の影響	92
5. 3 熱乾燥養生の影響	98
5. 4 総括	108

第6章 モルタル型枠と現場打ちコンクリートとの一体性	109
6. 1 概説	109
6. 2 せん断応力下での接合性	110
6. 3 引張応力下での接合性	118
6. 4 総括	123
第7章 モルタル型枠を埋設した鉄筋コンクリートはりの性状	124
7. 1 概説	124
7. 2 鉄筋コンクリートはりの作製と載荷方法	125
7. 3 モルタル型枠と鉄筋コンクリートの接合性	127
7. 4 鉄筋コンクリートはりの曲げ性状とせん断性状	134
7. 5 総括	138
第8章 結 論	139
謝 辞	144
参考文献	145

第1章 序 論

1. 1 研究の背景

総理府が全国の18歳以上の者を対象にした1995年2月の「科学技術と社会に関する世論調査」で、有効回収数2045人（同率68.2%）から得られた「科学技術が今後貢献すべき分野」という項目の回答（複数回答可）を、多いものから順に上げると、①地球環境や自然環境の保全（68%）、②エネルギーの開発や有効利用（62%）、③資源の開発やリサイクル（58%）、④廃棄物の処理・処分（57%）、⑤防災や安全対策（54%）、⑥土木・建築、交通・運輸、情報・通信（41%）、⑦健康の維持・増進（39%）、⑧高齢者や身体障害者の生活の補助（38%）、⑨工場での生産活動（33%）、⑩食料（農林水産物）の生産（30%）、⑪家事の支援や衣食住の充実（19%）、⑫その他（2%）、⑬とくにない（1%）、および⑭わからない（6%）であった¹⁾。この結果では、阪神・淡路大震災直後であり、防災や安全対策の関心度が高いにもかかわらず、環境保全への注目度が最も高く、ついで省資源・省エネルギーやリサイクル、さらに生活や労働に対する安全性や快適性を期待していることがわかる。このように、国民の関心が非常に高い環境問題については、科学技術を担う研究機関や産業界における最大の課題といえる。

近年の顕著な環境破壊は、イギリスでの産業革命期に始まるとされ、わが国でも第二次大戦後の高度成長期に大きな傷痕を様々な形で各地に残した産業公害や交通公害などの訴訟を初めとする諸問題が今でも新聞紙上に登場するが、近年は、温暖化、オゾンホール、海洋汚染、砂漠化、酸性雨などに代表されるように、地球規模で議論される問題にまで発展している。1992年にリオ・デジャネイロで開催された環境と開発に関する国連会議（地球サミット）では、「環境と開発に関するリオ宣言」や「アジェンダ21」が採択され、わが国でも、1993年に「環境基本法」が制定されて「アジェンダ21／日本政府」が発表された²⁾。

温暖化については³⁾、IPCC（気候変動に関する政府間パネル）で、石油、石炭、木などの燃焼によって急増している温室効果のある炭酸ガスと逆作用のあるエアロゾルとの関係、大気と海洋を循環する炭素量の計算など、世界の第一線科学者による最新情報に基づき、1995年に「人間の活動が原因で、地球が温暖化しつつある」と判断し、「すでに事態は進行しつつある」と警告を発している。干ばつ・高温、海面上昇、台風巨大化などの気象災害、病虫害などが懸念されている温室効果ガスには、二酸化炭素、メタン、フロンなどがあり、これら3種の温暖化

への寄与度は1992年の調査で各々64%、19%および10%といわれ、最も高い炭酸ガスは、1992年の調査で人類が消費する化石燃料によって年間約61億t（炭素換算）排出されている。大気中の炭酸ガス濃度は、18世紀まで280ppm弱で安定していたが、現在では350ppm強にまで急増している。また、炭酸ガスは、陸上植物、植物プランクトン、水などに吸収されるが、人工衛星観測データによる調査で、人間活動の影響が生じる前には年間618億tあった植物の炭酸ガス固定量が、現在では494億tとなっており、減少分の大部分となる99億tが熱帯雨林の損失によるものであるとの指摘もある。1997年末には、地球温暖化防止条約第3回締約国会議が京都で開かれることも決まっている。

このような世界情勢の中で、わが国が東南アジアから製品あるいは原木として大量輸入している合板型枠に適する熱帯材は、安価で年輪や節がなく、強度があり、コンクリートの硬化不良や着色などの弊害のないフタバガキ科ラワン類の巨大広葉樹だが、成長が遅くて伐採対象となる直径50cm以上の巨木は6本/ha程度しか生育せず、育種も難しいために商用的植林も確立されていない^{4~7)}。熱帯地域は、現在急速に開発している国が多く、経済発展や人口増大により、これらの商業用材や燃料用薪炭材の切り出し、農耕地や放牧地の開発、鉱物などの資源採取、交通網の整備などが進み、熱帯雨林が激減して、生態系異変、砂漠化、土壌流出、温暖化などの環境問題に発展しているとの指摘がある^{8~10)}。

地球表面の約7%にすぎない熱帯林では、年間7~9t/haの炭素固定能力があるといわれているが、年間約1800万haとされる面積の減少により、炭素の貯蔵源から樹木や土壌からの放出源に変わるばかりでなく、地球上の50%以上が生存する生物種の危機にも関与する。ラワン類の産地である東南アジアでは、国内産業の振興を主目的に、丸太の輸出がインドネシアで1985年、西マレーシアで1972年、サワラクで1980年、フィリピンで1986年、パプアニューギニアで1980年に禁止され、インドネシアでは直径50cmに満たない樹木の伐採の禁止や製材品の輸出規制も行われているが、熱帯林の減少は確実に進行している。

欧米では、地震が少ないこと、放牧や燃料などのために大規模な森林伐採を過去に経験したこと、良質の石材が豊富でコンクリートの歴史も長いことなどから、従来から石造建築が多く、プレハブ・プレキャスト化、針葉樹型枠の利用なども進んでおり、熱帯材合板の利用で突出した状況にあるわが国は、国際熱帯木材機関や世界銀行によって過剰伐採が指摘され始めてから、消費国、産出国および第三国の間に意見の相違はあるが、第三国に該当する欧米を中心として国際的な非難を浴びている。

1990年代初頭における世界全体の熱帯材伐採量は約14億m³/年で、総輸出量が約5000万m³/年、わが国が合板、丸太、製材、チップなどとして輸入する量は約1500万m³/年で土木・建築用のコンパネと呼ばれる12mm厚以上の合板が400万m³

/年強で、これは約220万m³/年の型枠用と200万m³/年弱の住宅用とからなっている。熱帯材伐採量に占める合板型枠の比率自体は小さいが、東南アジアの限られた地域から、数十年にわたってラワン類を切り出し、10回に満たない転用で短期間のうちに廃棄焼却されるため、とくに型枠への非難が集中している。

また、GATT（関税貿易一般協定）における1993年のウルグアイ・ラウンドでは、「貿易の技術的障害に関する協定」が最終合意されたが、公共事業にも市場開放が求められ、入札・契約制度の改革推進や海外企業の参入対策が検討されている。この、GATTでも「貿易と環境に関する作業部会」が設置され、貿易と環境との両立を探っている¹¹⁾。

国内においては、対外貿易不均衡の是正と1990年をピークとしたバブル経済崩壊の不況対策として、1995年度からの10年間に総額630兆円の公共投資を行って社会資本の充実を謀る新公共投資基本計画を1994年に策定した¹²⁾。この計画では、本格的な高齢化社会を間近に控えて、この期間に国や地域における新幹線・高速道路・情報通信インフラや環境・福祉・文化機能に係わる社会資本ストックの整備に主眼が置かれているが、高齢化に加えて、200兆円を優に越える国債発行残高をもつ不健全な財政、1995年の阪神・淡路大震災の復興なども含めた既存物の更新維持補修投資の増加、安定期に入った経済活動、多品種少量生産への社会ニーズの変革などを考えると、この計画後の新規建設事業への公共投資の伸びは期待できず、ゆたかな生活を支える「くにづくり」や「まちづくり」に直接携わる建設市場では、建造物における品質の多機能性や長期安定性、生産性の効率化や低コスト化などが重要課題となっている。

わが国の建設工事費は、国際的にみても高額といわれており、財政再建などのうねりの中、公共事業のコストダウンが必須となっている。この場合、標準的な鉄筋コンクリートの工事原価は、コンクリートや鉄筋に比べて型枠工事費が多くを占めるともいわれており、その合理化が大きな課題となっている。

バブル崩壊後、建設投資は鈍化しているといえども、貿易摩擦による内需拡大政策、経済不況対策、阪神・淡路大震災復興などによる公共投資や低金利政策などによる住宅建設などが好調である。しかし、建設業界では、安値受注、過当競争などが日常化し、経営悪化などから倒産する業者も増えており、1994年度末時点での全国の建設業許可業者数は55万社を越えており、1年間に約8600社が増加して約3200社が倒産するなど、業界の構造は非常に不安定で、建設投資と業者数の増減などの建設市場のメカニズムを建設省が1997年度から調査する運びとなっている。また、建設現場作業の時間、場所、内容、環境、人間関係などに安定性、安全性、快適性などが乏しい労働条件が災いしてか、鉄筋工、型枠工などの建設技能者の不足、高齢化、未熟化などが深刻化しており、景気回復が足踏み状態で、完全失業率が3%以上で失業者も200万人を超える高水準が続く中、総務庁の95

年国勢調査結果（速報）では、全産業における技能工および建設・労務作業者が前回調査時よりも2.4ポイント減って28.9%となっている^{13)~16)}。

有識者意識調査による鉄鋼、電力、自動車、造船、家電、石油・化学、運輸、流通・サービス、商社、銀行、証券などの業種と比べた建設業界に対する認識イメージでも、技術力がトップで、地球環境への配慮も第5位に位置するが、文化・社会貢献活動、生活者の声の反映、広報・広告活動などは下位にランクされており¹⁷⁾、建設工事における工業化・省人化、雇用条件の改善なども急務といえる。

このようなことから、全国建設業協会では人材確保対策特別委員会が設置されて1993年に報告書「生涯託せるやりがいのある建設業をめざして」を発表したり、工事現場でのイメージアップにかかわる経費を積算段階で共通仮設費などに計上できるようにするなど配慮がなされてきてはいるが、リストラや人材確保対策といった企業努力も建設業界では一層重要となっている。

さらに、1980年代、コンクリートでは、塩害、アルカリ骨材反応、炭酸化などによる劣化問題がマスコミで取り上げられて社会問題となった¹⁸⁾。

わが国のコンクリート構造物における早期劣化に警告を発したのは、1983年3月のNHKテレビ番組の土曜レポート「警告！コンクリート崩壊・忍び寄る腐食」であり、山陽新幹線のコンクリート構造物に除塩されていない海砂を使用したことによる塩害が取り上げられた。同年には、国道7号線におけるPC道路橋の塩害、山陽新幹線や阪神高速道路の高架橋におけるアルカリ骨材反応による劣化なども報道された。翌1984年には、NHKテレビ番組のNHK特集「コンクリートクライシス」で、狭山台団地の鉄筋コンクリート建物の異常劣化が放映され、NHKでは、数回にわたってクローズアップ「マンション点検シリーズ」を放映し、新聞各社も各地でのコンクリートの異常を報道し始めた。この狭山台団地に関しては直ちに東京大学生産技術研究所小林研究室で調査を始め、アルカリ骨材反応や炭酸化などの相乗作用によるものと判明された。また同年には、英国の経済雑誌「The Economist」で、塩害、炭酸化、施工不良などによるコンクリート構造物の早期劣化が、世界的規模で発生していることが指摘された。

また、1990年には、NHKテレビ番組のスペシャル「つららは警鐘を鳴らす・しのびよる酸性雨禍」などが放映され、使用材料や施工法などの内的要因だけでなく外的環境も、コンクリートに厳しい時代となっていることを指摘した。

いずれの場合も、建設後十数年あるいはそれにも満たない間に、人間生活の基盤となる重要な構造物に補修・補強を要する鉄筋腐食やひびわれなどの劣化を起こしており、コンクリートの耐久性神話を崩壊させ、関東大震災、阪神・淡路大震災などと同様に、コンクリートの世界に大きな影響を与えるものとなった。「コンクリート構造物の早期劣化問題について、国内の各界をあげて取り組む契機

を与えたのは、土木学会でもなければ、建設省でもなく、NHKを初めとするマスコミの力であった」と、狭山台団地の調査を行った小林一輔博士は指摘している。

メンテナンスフリーといわれたかつてのコンクリート構造物も、設計・施工の不良、環境・要求機能の変化などから、物理的・化学的あるいは社会的寿命が疑問視され、高耐久化、調査・診断、維持管理、補修・補強などに関する研究・開発が活発となり、阪神・淡路大震災後は、設計・施工面での再検討に加えて、災害時対策をも含めたメンテナンスの重要性も問われている。これに呼応して、土木学会からは、「コンクリート構造物の維持管理指針（案）」（1995年）や「コンクリート構造物の耐久設計指針（案）」（1995年）が刊行され、日本コンクリート工学協会でも「コンクリート構造物の耐久性診断・評価手法に関する基準（案）」（1989年）や「海洋コンクリート構造物の防食指針（案）—改訂版—」（1990年）の発行や「コンクリート構造物の補修工法研究委員会」の活動などが行われており、日本建築学会でも「鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断および補修指針（案）」を作成中であり、これらの標準化が進行中である。

また、「まちづくり」の基盤となる社会資本を構築するための主要材料であるコンクリートでは、長期耐久性に加えて地域と密着した快適な生活環境を提供するための景観が重要視にされる風潮にあり、着色や造形などの意匠性、既存物や他の景観材との調和性なども要求されるようになってきている。

以上のようなことから、自然や人にやさしいグローバル・シビルエンジニアリングの必要性が問われており、建設業界では、ISO14000（環境管理）やISO9000（品質）の認定や各種資格の取得、熱帯雨林合板型枠、建設廃材、リサイクル、緑化、省エネルギーなどの環境保全活動、工業化、省力化、時短などの雇用条件の改善、CALS（コンピュータネットワークによる生産・調達・運用支援総合システム）、VE（バリュー・エンジニアリング）、DB（デザイン・ビルド）、CM（コンストラクション・マネジメント）、QM（クオリティー・マネジメント）などの導入の検討など、多方面から様々な試みがなされている。

1. 2 研究の目的

わが国の建設関連業界では、1980年代後期から環境保全への取り組みが本格化し、熱帯材合板型枠代替品、エココンクリートなどのエコマテリアル、産業副産物や建設廃材のリサイクル、近自然化、修景、緑化などの検討が行われるようになってきている。

コンクリート型枠用熱帯材合板型枠の削減については、その消費量を5年間で

35%削減する行動目標を建築業協会が1992年に設けたり、企業独自に地球環境対策部局の設置や環境活動保全目標を掲げるなど、大手企業を中心として、植林の容易な針葉樹林による合板型枠、金属、合成樹脂、人造木材などを用いた型枠の開発やそのリサイクル、施工の合理化という目的も有する型枠解体を不要にできるセメント系永久埋設型枠の開発やプレキャストコンクリートの利用などが徐々に進められている^{1)~4)}。しかし、型枠を扱う建設関連企業は全国各地に無数にあり、経営基盤の脆弱な小規模業者の割合が高く、国を上げての活動にはいたっていないのが現状である。

これらの中で、永久埋設型枠は、建設現場でコンクリートの打設後も取り外さずに、そのまま躯体や仕上げ面の一部とするハーフプレキャストコンクリートともいえる。これを用いた工法については、次章で説明するが、工場や現場近くのヤードであらかじめ製造したコンクリート製品を現場に輸送して組み立てるフルプレキャストと、型枠工、支保工、鉄筋工、打込み、表面仕上げ、養生などを要する従来型コンクリート工法とを融合させた工法である。

しかし、永久型枠製品の場合には、構造物の断面に埋設する型枠断面が小さく、従来工法をより積極的に取り入れることになるので、パーシャルプレキャストコンクリートともいえるが、一般的には永久埋設型枠工法と呼ばれる。

比較的肉厚で形状や寸法などが雑多な既製のハーフプレキャストコンクリートに比べ、寸法や品質などに数種の規格を設けるだけの薄肉埋設型枠板は（例えば、品質では、標準・耐久Ⅰ種・耐久Ⅱ種など）、製造、運搬、保管などに有利で、使用に際しても軽量で切断などの加工も可能で、あらゆる部位に利用できるという汎用性に利点がある。この点は、山岳、海洋、地中あるいは市街地などの地形や気象などの自然環境、ならびに交通事情や地域性などの社会環境などに各種制約の多い現場、あるいは大規模・高所での工事などでも威力を発揮できる。また、通常の建設現場でも、規格化された埋設型枠を利用すると、型枠工事、養生、表面仕上げなどの工程を短縮でき、機械化・ロボット化・情報化などの工業化による省人化も可能となり、10回にも満たない転用の後に廃棄焼却されて炭酸ガスを放出したり、保管や運搬などに手間を要する合板型枠などの建設廃棄物の発生を抑えるという利点もある。なお、建設工事での合理化施工が推進されれば、工事現場で常に遭遇する周辺の環境や住民に対する建設公害や交通障害などの軽減にも寄与できる。

加えて、埋設型枠は合板型枠と同様なせき板と考えられ、フルプレキャスト化などでは意識革命を必要とする従来工法で培ってきたコンクリートの施工技術、支保工などの仮設材、作業員の技能などが活用でき、全国各地の生コンやポンプなどを扱う業者や設備なども無駄にはならず、埋設型枠の製造技術が容易になり、建設現場で広く使用されれば、製品工場での品質や雇用の安定にも貢献できる。

さらに、塩害、中性化、アルカリ骨材反応などといったコンクリートの劣化が社会問題としてあげられたり、海洋や地下、廃液や酸性雨、寒冷地などの厳しい環境下に構造物が次々と建設されているが、社会資本となる新規事業への建設費のみならず、維持管理更新費なども含めた公共投資は、やがて縮減方向に移行するであろうことを危惧すると、コンクリートの高耐久化やメンテナンスフリー化は必須の問題であり、地域を魅力的で活力のあるものとするための社会基盤となる建設構造物の景観も重視されている。これらの表層に位置することになる永久型枠には、イオン、ガス、水分などといった劣化因子のしゃへい効果、着色や模様化、タイルや天然石などの仕上げ材先付けなどによる化粧効果などを容易に寄与できる能力も備えている。

また、天然砂の枯渇化や、天然砂の採取が環境に及ぼす影響が指摘されており、コンクリートの表層部を永久型枠で高品質化することで、現場打ちされる構造物本体部に、副産物を有効利用するものの長期養生を要するフライアッシュやスラグなどの多量使用コンクリートや砂を使わないものの補強材の防食性に問題のあるポーラスコンクリートなどを利用したり、施工性の改善効果は高いものの型枠強度や養生に注意を要する高流動コンクリート（ハイパフォーマンスコンクリートを含める）などとの組み合わせも、将来性のある工法といえる。とくに、高流動コンクリートに関する技術は、流動性と分離低減性を合わせもつための使用材料や配合、練り混ぜなどの検討、充填性確認システムなどの技術開発などが進んでおり、永久型枠を使用した建設現場のみならず、薄肉断面となる永久型枠自体を作製する製品工場でも有用なものとなり得る。

コンクリートの打設後も、撤去せずにそのまま構造物の一部として残し、散水などの養生や表面仕上げなどを簡素化できる埋設型枠あるいは打込み型枠は、地下構造物などでの捨て型枠、タイルなどを先付けする化粧型枠、合成床スラブ工法など、合理化施工を目的としたプレキャスト型枠工法が建築工事の一部で従来から利用されている。これらの施工性に加えて、環境、耐久性なども重視する埋設型枠という概念から、永久という名をつけた多機能型の型枠を、建築構造物に比べると、大断面の部材で構成され、単品生産色が濃く、大きい活荷重が繰り返し作用し、厳しい環境下につくられることが多く、設計耐用期間も長いという特徴を有する土木構造物に適用しようとする技術が最近注目され始めている。

しかし、永久型枠工法は、従来の型枠工法に比べて、型枠の使用材料、製造、組立などに多大な経費と特殊な技術を要し、工期、人員、経費など積算の容易な合理化施工という目的以外に、価値を現実的なものとして算定しにくい環境、耐久性など多くの目的を秘めているため、本四連絡橋の橋脚工事など厳しい環境下にある構造物で、大手建設会社を中心として最近開発され、土木研究センターの技術審査・証明を受けた数種の永久型枠工法などが試験施工されている程度であ

り、企業における環境保全への取り組みをアピールするパフォーマンスに過ぎないのが現状であり、熱帯材合板型枠からの転換策には、永久型枠以外の前述した手法が優先的に使われている。

また、構造物の耐久性や景観の改善、施工簡素化や廃材削減などに役立つといえるモルタル板を開発できれば、永久型枠としてだけでなく、近年施工量が急増し、施工上の制約や要求性能の多様化などから特殊な材料や技術を要する補修・補強材としての利用も可能となる。さらに、電磁気的な機能を付加できる材料を利用することも容易となるため、電気防食、デサリネーション、再アルカリ化などにおける外部電源方式の耐久性電極材を兼ねたり、インテリジェントビル、医療機関、リニアカーなどの電磁波障害の恐れのある施設へも応用できる。

つまり、永久埋設型枠に期待される機能としては、次のような点である。

- ①合板型枠からの転換による熱帯材を主とした森林資源保護
- ②コンクリート構造物の耐久性および景観の向上
- ③建設現場の工期短縮・省人化、および建設廃棄物・資材の削減
- ④現場施工における従来工法とフルプレキャスト工法との合理的複合化
- ⑤各種の構造物や部位への順応性
- ⑥工場での製造技術の容易さやコストの整合性
- ⑦現場打ちコンクリートやコンクリート製品の様々な技術との適合性
- ⑧電磁波特性などの機能性付加、補修・補強材への転用などの適用範囲の拡大性
- ⑨コンクリート骨材用天然砂の保護、産業副産物の有効利用などへの対応性

このような永久型枠を新しく開発するには、構造物本体と同様な性状をもつセメント質材料を母体とするのが、経済性、施工性、一体性、メンテナンス性などの面からも適当と考えられるが、現場作業性などから薄板状となる型枠の場合、ひびわれ抵抗性やコンクリート腐食因子のしゃへい性を高めるために、繊維材料や超微粒子材料などを利用してセメントマトリックスの補強や改質を行う複合化が必要不可欠のものとなる。

高耐久性埋設型枠は、砂防ダム越流部の摩耗対策として1985年に試験施工された大成建設のポリマー含浸コンクリート板(PICフォーム)に始まるとされるが、高価な材料を用いて特殊な装置で製造され、板の組立や連結性などの現場施工にも問題があるため、当時はさほど注目されなかった。とくに工事コストについては、国民の税金を主財源とする公共事業であるという色彩の強い土木事業では、他の産業に比べて非常に重視されるものである。

筆者は、日本道路公団が北陸自動車道路親不知海岸RC中空床版高架橋で1986年に行った塩害対策の一つで、東京大学生産技術研究所小林一輔研究室の指導による防食型枠工法に着目し^{41) 42)}、1989年度における同研究室での研修時より、その機能性をより広げた永久型枠の開発に着手し⁴³⁾、これに適用する連続繊維補

強ポリマーセメントモルタルに関する使用材料、配合、養生、品質などの検討、永久型枠としてモルタルを使用した場合の現場打ちコンクリート本体との一体性や複合部材としての載荷性状などの調査を続けている^{44) 45)}。なお、高架橋での防食型枠は、多くの混和材料を使用し、特殊なミキサで練り混ぜ、補強性に問題のあるポリエチレンネットを十数mm程度の薄肉板中に10枚配するなど、品質、製造法、価格、施工性などの点で改善の余地が多く、その後実用化されてはいない。

筆者の研究では、海洋橋梁基礎などで試験施工されているような腐食因子のしゃへい性能は高いものの材料単価が非常に高くかつ特殊な製造技術を要するレジコンクリート、エポキシ・繊維補強コンクリート複層板、ポリマー含浸コンクリートなどの最近開発された永久埋設型枠ではなく、材料費を抑えて通常の装置でも製造でき、薄肉で輸送性や加工性に優れ、厳しい環境下のみならず通常の環境下でもメンテナンスを不要とできるような高い汎用性があり、安定した需要を望める永久型枠製品を、連続繊維メッシュやセメント混和用ポリマーを有効利用したセメントモルタルで開発し、永久埋設型枠の性能評価や設計・施工に関する標準化のための資料を得ることに重きを置いている。

1. 3 研究の概要

本論文は、建設業界が最近着目し、学術的検討のほとんどない、地球環境、労働生産性や労働者対策、コンクリート構造物の耐久性や景観などにかかわる永久型枠製品について、7年間にわたる筆者の研究成果をまとめたものである。また、研究の主体となっている実験は、筆者が徳島大学河野清研究室で1980年代に行った繊維補強コンクリートや製品用コンクリートなどの各種性状、繊維や微粒子に関する使用材料、配合、練り混ぜ、締固め、成形、養生などの製造技術などに関する様々な研究実績や^{46) 49)}、東京大学生産技術研究所小林一輔研究室で培った実験のノウハウが大きな糧となったものである。

本研究では、工場製品となる永久型枠をセメントモルタルで作製するため、ポリマー混和材料や連続繊維メッシュ補強材料の有効利用に着目し、各種のポリマーやメッシュ、あるいは数種のセメントや骨材を使用した場合のモルタル性状を調査するとともに、モルタルの加熱促進養生効果、接合面に各種突起を設けたモルタルと現場打ちコンクリートとの一体性、モルタル型枠を埋設した鉄筋コンクリートはりの載荷性状などの検討を行い、永久型枠の実用化やモルタル複合板の試験法確立への足掛りとするを目的としている。このような観点から、本論文では、以下に示した8つの章で構成することとした。

まず、本研究の背景、目的および概要について本章で述べている。

第2章では、永久埋設型枠製品に関する開発動向について説明する。

第3章では、モルタル改質用のポリマー混和材料として、鉄筋コンクリート腐食因子のしゃへい効果が期待できる一般的なSBR（スチレンブタジエンゴム）系、EVA（エチレン酢酸ビニル）系およびPAE（ポリアクリル酸エステル系）系の3種と最近開発されたSA（スチレンアクリル）系の水性ポリマーディスパーションを使用したモルタルのフレッシュ時の空気連行性、流動性および材料分離性、硬化後の力学性状および耐久性などを調査するとともに、人工砕砂、天然湖砂および副産物フェロニッケルスラグ砂の3種の骨材や経済性を考慮したポリマー系減水剤の使用効果、板状工場製品で一般的な縦打ち成形法の可否、着色や造形による景観材としての利用価値、他のコンクリート技術との適合性などについても検討を行う。

第4章では、モルタル補強用の連続繊維メッシュとして、塩害などを起こさずにモルタルのひびわれ抵抗性を高める効果が期待できるガラス繊維、ビニロン繊維および炭素繊維を取り上げ、これらを使用したモルタル板の力学性状を調査し、ガラス繊維については、メッシュ構成の影響、セメントによるアルカリ劣化の抑制効果や繊維束の結合のために利用したEP（エポキシ）樹脂での熱圧処理やPAE系ポリマーでの浸漬乾燥処理の有効性なども検討する。

第5章では、工場製品となる永久型枠で重視される初期ならびに早期材齢での品質向上のため、加熱によるモルタルの促進養生として採用した工場で一般的なセメントの水和を促進する蒸気養生と、高価なポリマーの有効利用のために加熱による強制乾燥でポリマーの造膜効果を高める熱乾燥養生が、永久型枠用モルタルの力学性状や耐久性に及ぼす影響を調査するとともに、早強ポルトランドセメントの使用効果の検討も行う。

第6章では、永久型枠の実用化で問題となるモルタル製埋設板と現場打ちコンクリートとの一体性を確保するため、コンクリートとの接合面に、砕石や砕砂を散布して埋め込んだり、あるいは溝型や千鳥型の形状を転写して各種の突起を設けたモルタルを作製し、これをコンクリートに埋設した複合体の接合面にせん断力や引張力を与えた場合の影響を検討する。

第7章では、モルタル型枠を埋設した小型の鉄筋コンクリートはりを作製して載荷試験を行い、曲げおよびせん断特性、型枠とコンクリートとの接合性、ポリマーやメッシュの使用効果などを検討する。

最後に、第8章で、本研究の成果を総括的にまとめて結論とし、今後の課題や展望を述べる。

第2章 永久埋設型枠製品の開発動向

2.1 工場製品と型枠

(1) 工場製品

1824年にイギリスのレンガ職人Aspdinがポルトランドセメントの特許を取得し、フランスでは、Lambotが1850年に金網とモルタルによるボートをつくり、植木職人のMonierが1867年に鉄網とセメントモルタルによる植木鉢を発明し、Monierは管、水槽、平板、まくらぎ、屋根構造などの特許も次々と取得した。また、1907年頃にはアメリカでプレキャスト工法の原点となるティルトアップ工法が開発されるなど、石造建築文明ともいえる欧米では19世紀から鉄筋コンクリートやコンクリート製品の技術が普及している⁵⁰⁾。

代表的なコンクリートの工場製品といえる無筋コンクリートブロックがわが国で使われたのは明治後半でといわれ、1910年には鉄筋コンクリート間も使用され始めたが、1923年の関東大震災による影響でその後の発展はみられなかった。しかし、第二次大戦後の住宅不燃化推進方針に沿った材料として見直され、例えば、建築用の中空コンクリートブロックを用いた組積造の壁や塀が普及し、最近では耐震性を高めたRM（補強メーソンリー）構造の研究も行われている。また、1937年にJES（JISの前身）の「下水道用鉄筋コンクリート管」が作成されて以降、無筋コンクリート、鉄筋コンクリート（RC）、プレストレストコンクリート（PC）などによる多種多様な製品が規格化され、現在では70品目以上のJIS製品がある。

建築工事では、柱、壁、床、屋根などの部位が比較的小型で分割しやすく、規格化も可能なため、各々を工場で製造して現場へ輸送して揚重機などで組み立てるプレハブ化が進められている。わが国最初のプレハブ工法は、1955年に新宿の3階建アパート建設で採用されたティルトアップ工法といわれている。これは、建設現場で作製した大型パネルをクレーンで吊り上げて組み立てるものである。近年は、ケーソン、沈埋函、消波ブロック、魚礁、橋げた、橋脚などにみられる土木用プレキャストコンクリートの大型化、電磁波しゃへいなどにみられる高機能化、着色、パターン化、化粧材先付けなどによる意匠化、緑化や生物生息用のエコマテリアル化なども進行中である。

しかし、セメント・コンクリート製品工場で使用されるセメント量は、年間で8000万t程度を推移している国内セメント販売量の約15%で、同じく70%程度を

占めるレディーミクストコンクリート（これも製品といえる）の一部も、工事現場近くのヤードで製造されるプレキャストコンクリートに利用されている。しかし、施工の合理化や品質管理面などでの利点があるとはいえ、建設業界の体質、研究者不足などため、この比率は長年変わってはいない^{51)・52)}。また、コンクリート製品の種類は、規格化されている管、ポール、パイル、ブロック、道路製品、PC製品、スレート、木毛セメント板、気泡コンクリート製品など以外にも非常に多く、1985年度の工業統計によると、コンクリート製造業界の事業所数は8433で総出荷額が1兆2254億円となっており、産業規模はセメント業界を上回るものの、小規模企業が乱立しており、経営安定、技術開発、品質の維持向上などにも問題があり、共同事業の推進などが望まれている。

土木学会コンクリート標準示方書では、「プレキャストコンクリート」を、工場または現場の製造設備により、あらかじめ製造されたコンクリート製品または部材とし、「工場製品」を、管理された工場で継続的に製造されるプレキャストコンクリート製品と定義している。また、工場製品の特徴として、①材料、配合、製造設備、施工などの管理を容易に行いやすいこと、②熟練した作業員によって常時製造できること、③製造、取扱いなどの作業を機械化しやすく、省力化が可能であること、④作業の容易な場所でコンクリートの打込みが行え、天候に左右されることが少ないこと、⑤JISによって標準化され、実物実験のできるものが多いこと、⑥断面が非常に薄いものもあること、などを上げている。

さらに、製品の利点を加えるとすれば、⑦建設現場での型枠工、鉄筋工、打込み、表面仕上げ、養生などのコンクリート施工、建築物で大切な水やガスの除去のための乾燥作業などにかかわる合理化が計れること、⑧建設に要する工期やコストなどの見積もりが容易となり、入札・契約などの透明化に寄与できること、⑨熱帯材合板型枠などの建設廃棄物を抑制でき、環境保全につながることで、⑩継続した製品需要により、各地に働く場を安定提供できること、⑪省力化や品質管理を進めることで、工場や現場での安全管理に役立つこと、⑫着色や造形、表面仕上げなどによるコンクリートの景観改善が容易となること、⑬工期短縮や省力化、廃材削減などで工事現場周辺の環境や交通への被害を抑えられること、⑭品質が高く安定な製品が利用できるため、構造物の耐久性が高まり、劣化診断や補修・補強などメンテナンスが簡略化できること、⑮構造物などの解体・撤去、再利用などが容易となること、⑯ポリマー、繊維など新素材や、圧力、熱、放射線などの製造技術などの利用や複雑な形状の製品製造にも、比較的柔軟に対応できること、⑰かつての構造不況から経営困難となっている造船所、船舶などの産業基盤が大型製品の製造や運搬に利用できること、⑱製品製造、運搬、揚重などに関連する産業機械の需要が高まり、技術革新も期待できる。

しかし、欠点として、①交通事情や土地利用状況、コンクリートの重量などが

ら、陸上における大型製品の運搬や据え付けが困難であること、②一体性や連続性を要する土木構造物では、製品の組立時に鉄筋などの補強材やコンクリート自体の接合技術が確立されていないこと、③各種の規制が複雑なわが国では、信頼性を得るためのJISなどの規格取得に時間、経費、労力などを要し、新技術を利用できにくいこと、④コンクリート製品の利用が急速に進行すれば、様々な専門技術を有する現場技能工の職場が失われること、などが考えられる。

これらの、解決策として、工業化工法ともいえるプレキャスト工法と従来工法との中間的なものといえるハーフプレキャスト工法が注目されている。

この工法は、工場や現場近くで製造するプレキャスト部材を薄肉化して軽量とし、工事現場に運搬して組み立て、場所打ちコンクリートの打設によって一体化させるものであり、従来工法では品質、工期、安全性などが低い経済性が高く、逆にフルプレキャスト工法では品質、工期、安全性などが高い経済性が低いという両者の特徴を活かしたものであり、近年徐々に増えつつある。

（2）型枠

わが国の建造物は、豊富な森林資源、温度や湿度の変化が大きい気象条件、地震や台風などの自然災害などの関係で、木造が主流であったが、明治時代から西洋の文化や技術が導入され、石造あるいはコンクリート造が徐々に広まった。したがって、型枠工事やプレキャスト工法の歴史も明治時代後期から大正時代にかけて始まったと考えられている。

コンクリートに使われるの型枠は、せき板と支保工からなるが、わが国では、明治時代から豊かな国産木材資源が利用され、1917年に清水組が使った木製の框（かまち）式型枠から定尺パネルに発展し、2×6尺が基準寸法となって盛んに利用された。第二次大戦後の復興、景気好転、高度成長などと続いた経済発展の中、建設工事の急増や大規模化、作業員の不足や賃金高騰などが進行し、建設工事の近代化・工業化が必要となり、各種の技術開発が行われてきた。

型枠工事の場合、アメリカで開発され、わが国では1953年に試用されて1959年にはJIS化したメタルフォーム、および戦後の米軍関連工事で使われ始めて1967年にJAS化された合板せき板が、合理性やフレキシブル性に富む資材として普及した^{53)・54)}。これに伴って、従来の木製型枠は1960年頃から徐々になくなり、最近ではほとんどみられなくなっている。また、土木分野では、スリップフォーム工法、トラベリングフォーム工法、プレキャスト部材合成工法などの合理化型枠工法やコンクリートの品質向上を目的とした透水性型枠工法、さらに建築分野では、化粧材先付け型枠、ラス型枠、合成壁型枠などによる打込み型枠工法、PC板や鋼板によるサポート軽減工法、プレハブ工法などの合理化型枠工法などの特殊

型枠工法が次々と開発されている^{55, 56)}。

大手企業関連の施工現場を対象とした（サンプル数；建築 761，土木59）使用型枠種別調査では⁵⁷⁾，建築の場合，無塗装合板54%，デッキプレート16%，塗装合板14%，プレキャストコンクリート型枠9%およびその他7%で，土木の場合，塗装合板35%，メタルフォーム28%，無塗装合板25%，プレキャストコンクリート型枠5%およびその他7%という状況となっている。建築現場に比べて土木現場では，プレキャスト型枠の利用度が低いもののメタルフォームの使用が多く，合板の使用割合は若干低くて無塗装合板よりも転用率の高い塗装合板が多いことがわかる。しかし，いずれの現場でも熱帯林合板型枠の利用度が過半数を超えているのが現状である。

現在，土木・建築工事で多用されている合板型枠は，フィリピン，マレーシア，インドネシアなどに限られて生育する南洋材フタバガキ科のラワン類で占められている。この大量使用が始まった1960年代から日本企業が進出して乱伐し，産出する地域の変遷やナショナリズムの台頭，臨海部から内陸部への伐採地の移行，200種を越えるといわれる使用ラワン材の混在による品質管理の難しさなどから，合板の価格が上昇傾向にある^{58, 59)}。また，世界的な環境問題の高揚から，建設企業にも地球環境を扱う部門の設置や環境保全活動が活発化し，建築業協会における熱帯材消費削減行動目標などへと発展している。

熱帯木材からの型枠の材料転換策としては，第1章でも提示したが，①塗装合板，②針葉樹材合板，③複合合板，④金属型枠，⑤合成樹脂型枠，⑥木質系型枠，⑦永久埋設（打込み）型枠，⑧プレキャスト工法などが現在検討されている。

①は，合板型枠をウレタン系樹脂やアクリル系樹脂で塗装し，耐久性や転用性を高めたもので，木材成分によるコンクリートの着色や硬化不良の抑止，コンクリート面の平滑化，剥離剤塗布の簡略化などにも有効で，現在多用されている。

②および③は，商用的植林の行われている針葉樹を②では100%，また③では心材に使用するもので（大林組），試験施工では支障のないことが確かめられているが，生産国であるロシアやカナダの永久凍土地帯では，森林伐採による日光照射などで凍土が融解し，湿地化や温暖化効果ガスのメタンガスの放出などの環境破壊を起こしており，短期的な代替材と考えられる。

④は，従来からのメタルフォームが一般的だが，さびずに軽量でリサイクルが容易なアルミを押し出し成形した外枠や中枠と，セメントのアルカリに耐えられるように表面処理した耐食性アルミ合金製面板とを一体化させ，数10回の転用に耐えられる型枠（鹿島）なども，高価ではあるが市販もされている。

⑤は，せき板にプラスチックの成形板を使用するもので，軽量で，切断，くぎ打ち，折り曲げなどの加工性が高く，剥離性や美観にも優れ，コンクリート充填性確認用の半透明化や作業環境を明るくする色彩化，自由な形状の型枠作製やリ

サイクルなども可能となる。ポリプロピレンを段ボール状断面に押し出し成形したせき板（鹿島），ポリプロピレンと発泡材を使用したもの（津田鋼材），繊維強化ポリプロピレン樹脂を使用したもの（住友化学工業），硬質塩化ビニル製のもの（戸田建設），基礎地中はり工事用で軽量性，断熱性，溶融後処理性などに優れた発泡スチロール製型枠（三菱油化），木造住宅の基礎用に断熱効果を寄与したポリスチレンフォーム製の打込み型枠材（ハウステック），塩化ビニル製中空押し出し成形板の打込み地下防水型枠（クボタ），南洋材合板にポリプロピレンシートをはって転用回数を20回以上としたりポリ塩化ビニルのリサイクル材を用いたもの（竹中工務店）などの他，アルミフレームとガラス繊維強化樹脂板とを組み合わせたシステム型枠（長谷工コーポレーション）などもある。

⑥は，廃木材のチップ，ガラス繊維メッシュ，樹脂などを用いたもの（清水建設），各種の廃木材チップをファイバー化して接着剤などを添加して熱圧成形したMDF（木質系中質繊維板）製のもの（三井建設），新聞紙などの低級古紙に液状メラミン樹脂の混入やウレタン系塗料を塗布を施したもの（西松建設），さとうきびの搾りかす（バカス）を利用した板や中国などで利用されている竹製型枠を合板に改良したもの（日本型枠工業）などである。なお，紙製型枠としては，円柱形の部材や空洞を作製するチューブとボイドが市販されている。

⑦および⑧は，プレキャストコンクリートなどを型枠に代用するもので，型枠の撤去や養生，化粧仕上げ，廃材処理などの作業を簡略化できるため，工業化・省力化工法として各企業が積極的に取り組んでおり，普及している建築分野の合成床工法や土木分野の合成床版工法などに使われるハーフプレキャスト部材のPC板など，分類に苦しむものもある。なお，プレキャストコンクリート製造にも型枠が必要となるが，これには，転用回数，寸法精度，成形性，養生法などを考慮して剛性の高い鋼製型枠が通常使われている。

上述した①～⑥の型枠は，熱帯雨林の保護，リサイクルなどの環境重視型で，型枠の材質を従来の合板型枠と変えることによる転用型枠といえるが，⑦と⑧にの埋設（打込み）型枠については，プレキャストコンクリートによる合理化施工から環境問題やコンクリートの耐久性や景観などの向上に発展したものといえる。

2. 2 埋設型枠製品

埋設型枠とは，コンクリート工事において，コンクリート製品などを型枠代わりに使用し，コンクリートを打込んだ後は脱型せず，そのまま残すものを意味し，建築では，プレキャスト（PCa）型枠あるいは打込み型枠と呼ぶことが多い。しか

し、多種多様な製品や工法が考案されてはいるが、歴史が浅く実用化も進んでいないためか、現在のところ学術的用語や定義も決まっていない。しかし、前節で述べたような理由から、埋設型枠を用いるハーフプレキャスト工法の実用化が、土木・建築分野で進みつつある。

建設省では、1990年からの5か年計画総合技術開発プロジェクト「建設工事における施工新技術の開発」における課題の一つに、「自動化適合型鉄筋コンクリート構法」が設けられ、建築分野工事における「薄肉打込み型枠材料の評価技術の開発」が検討されてきた。また、建設省では、建設技術評価に基づく1992年度の公募課題として、「鉄筋コンクリート造の柱・はり型枠の施工合理化工法の開発」を取り上げ、工場で生産される建築工事用プレキャスト型枠の評価を行い、1994年に評価証を7グループに交付している。ちなみに、1988年から5年間続いた総合技術開発プロジェクトでは⁶⁰⁾、「建設事業への新素材・新材料利用技術の開発」を課題としており、コンクリートに関するワーキンググループでは、本研究の主要材料の一つである繊維などに関する研究が進められ、1995年に建設省大臣官房技術調査室監修の「連続繊維補強コンクリート—諸性質と設計法—」（技報堂出版）が発行されている。

また、土木技術センターでも、公共事業における新技術の実用化促進のために「民間開発建設技術審査・証明事業」制度が設けられ、1993年には、公募型技術審査証明制度の課題として建設省が制定した「型枠脱型を不要にし工事の省力化・省人化を図るとともに、美観・耐久性に優れたプレキャスト型枠技術」というテーマで、4件が審査証明を得ている。また、開発課題や審査項目を依頼者が自由に決められる従来型技術審査証明制度でも3件が審査証明を受けている。

しかし、プレキャストコンクリート、繊維補強コンクリートなどのように、実用化の進んでいるものと違い、合理化、環境保全、高耐久化、修景など様々なニーズや、多くの材料や施工に関する建設技術を複合化させた比較的新しいテーマであるため、設計・施工に関する規準や手引書的なものは今のところみられない。

参考文献としてもすでに取り上げたが、セメント協会の月刊誌「セメント・コンクリート」では、1995年に「コンクリート製型枠」に関する特集号を発行している。この特集号は、土木・建築分野での合理化施工を目的としたプレキャスト型枠に関する記述が中心となっており、地球環境や地域景観、耐久性やメンテナンスなどは補足的に扱われているが、現状では永久埋設型枠に関する世界で唯一まとまった文献といえるものである。これを主な参考資料として以下の説明を行うが、プレキャスト型枠工法の発展経緯には、建築と土木との間かなりの相違があるので、まずこれから述べることにする^{61), 62)}。

(1) 建築工事における埋設型枠工法

今は解体されているが、大正元年に石造ブロックを積層して埋設型枠とした鉄筋コンクリート倉庫が横浜に建設されている。これは特異な例であり、わが国の建築工事でプレキャスト型枠工法が実用化され始めたのは1960年代後半で、支保工や型枠などの資材が充満する床下空間の有効利用、コンクリートの強度発現や仕上げに要する工期短縮などにかかわる合理化施工を目的とした種々の床用ハーフプレキャスト合成スラブが次々と開発されている。この工法では、鉄骨造の場合に鋼製デッキプレートも使用されるが、適用スパンを比較的長くでき、耐火性能に優れたRC・PC製のプレキャスト板をはり上に配し、その上に場所打ちコンクリートを打設して合成床スラブができる。使用されるRCまたはPCのプレキャスト板は、フラットタイプ、軽量化やたわみ剛性向上のために空洞を設けたボイドタイプや折板・リブタイプの3つに大別でき、RC板の適用スパンは7~8mが限度となり、これを越えるとPC板の域に入る。また、鋼製型枠床版には鉄筋付きのものも開発されている。

1980年代に入ると、柱や壁用の埋設型枠が登場するが、これらは、型枠にタイル、自然石、レンガなどの外装材を先付けしたり、ガラス繊維を混入して模様を付けるなどの化粧性や平滑な内装仕上げ下地をもたせ、建築工事で大切となる仕上げの合理化を兼ねたものである。さらに、壁の両側を埋設させる中空型枠や補強鉄筋を組み込んだものも開発されている。また、軽量化や余剰水排出のためにラスやメッシュを埋設型枠に利用したり、地下室や地下駐車場など地下空間用に防水性の高い合成樹脂製の埋設型枠も登場する。

1990年をピークとするバブル期には、急増する工事量と人手不足の解消のため、はり、バルコニー、階段なども含めたほとんどの部位の埋設型枠工法が可能となり、従来の場所打ちコンクリート工法、ハーフプレキャスト材およびフルプレキャスト材による複合化工法の考え方も提案される。バブル崩壊後のリストラが進む今日では、合理化施工がさらに推奨され、RC造マンションの早期劣化や耐震性への市民の関心、環境保全活動なども高揚し、埋設型枠工法が一層脚光を浴びるようになっている。

(2) 土木工事における埋設型枠工法

建築工事と比較して土木工事は、①規模が大きい、②荷重が大きく繰り返される、③環境条件が厳しい、④設計耐用期間が長い、⑤単品の生産色が強い、などの特徴があり、構造物におけるプレキャスト化が難しく、型枠工事では、剛性の高いメタルフォームやフレキシブル性に富む合板型枠が多用されている。耐久性

についていえば、日本建築学会の「建築工事標準仕様書」には、土木学会の「コンクリート標準示方書」の海洋コンクリートに該当する海水の作用を受けるコンクリートなどの条文はあるものの、一般環境下の通常使用状態においてとくに長い耐用年数を期待するものを高耐久性コンクリートとしたり、凍結融解作用を受けるコンクリートを別途設けており、水セメント比やスランプなどの具体的規定についても、土木構造物の条件が建築構造物より厳しといえる。

しかし、省力化、省人化、迅速化、品質安定化などを目指し、シールドセグメント、ボックスカルバート、擁壁、くい、橋脚、橋げた、ケーソン、沈埋函、魚礁など、分割できるものはブロック化し、また海上輸送や現場製造できるものは大断面で、というように徐々に施工実績も増えている。このようなフルプレキャスト化では、コンクリートや補強材の接合性、製品工場から工事現場までの道路や車両による輸送性などに問題があり、埋設型枠製品と現場打ちコンクリートとを組み合わせるハーフプレキャスト工法が有利といえる。埋設型枠によるハーフプレキャスト工法では、土木構造物の耐久性の改善や景観への配慮などといった社会的ニーズにも対応するため、品質管理のできる工場で、繊維などの補強材、ポリマーなどの改質材、着色剤や自然石などの景観材、非磁性材や導電材などの機能材などの高価で使用技術を要する材料を用いて数10mm厚の薄肉型枠を製造し、これを現場で利用することができる。

土木工事で開発された埋設型枠工法は、PC埋設型枠を橋梁床版に用いたPC合成床版工法で、わが国では合成型枠研究会が「PC埋設型枠を用いた合成床版設計施工要領（案）」を1970年に日本道路公団に提出している。アメリカではこの工法に早くから関心がもたれ、1950年台初期にイリノイ州で施工例があり、プレキャスト・プレストレスト・コンクリート・デッキパネルと呼ばれる工法でテキサス州に3橋が1963年に建設されてから多くの橋梁床版に利用され、1979年にAASHTOの設計示方書にデッキパネルの規定が制定されている。また、イギリスでも1979年に発表した「鋼コンクリートおよび合成橋梁に関する設計指針（BS5400）」にコンクリート床版の永久型枠に関する規定がある。

この工法は、型枠や支保工に関する合理化の他に、PC型枠製品だけにプレストレスを導入することで、ひびわれが少なく剛性の高い床版が得られるという特徴を有するが、従来工法に比べてコスト高になるため、わが国では汎用には到らなかった。しかし、1980年代に入ると、コンクリート劣化の社会問題化や交通量の増大などから橋梁床版の損傷が顕在化し、労働者の高齢化や技能レベルの低下などもあり、この工法が再認識され、土木学会では研究小委員会を設置して1987年に「PC合成床版工法設計施工指針（案）」（コンクリートライブラリー第62号）を作成した。この工法は、架設された主げた上に厚さ7cm以上で幅0.5m以上（1m標準）のプレテンション方式によるPC板を敷設し、型枠や支保工なしに現場打ち

コンクリートを打設するもので、主げたがコンクリートの場合は鉄筋で、鋼の場合はスタッドをずれ止めに使い、PC板の継ぎ目部は無収縮モルタルなどでシールし、PC埋設型枠上面に4mm程度の凹凸段差と吊り金具程度のジベルを設けて型枠とコンクリートとを一体化させ、合成床版を構成するものである。

しかし、わが国のPC埋設型枠は、土木用よりも優れた剛性や遮音性を利用するマンションや倉庫などの建築用床スラブとしての利用が圧倒的である。

なお、建築工事で打込み型枠と呼ばれることの多い型枠工法を、土木工事で埋設型枠や永久型枠という用語が使われるのは、このような経緯によるものといえる。

2.3 高耐久性埋設型枠

埋設型枠工法として実績のある建築用合成床スラブ工法や土木用合成床版工法などで用いられるセメント系型枠製品は、それ自体に耐荷力が要求されるために補強材を配したRCあるいはPCとなる。したがって、縦横方向に配される補強材の組立や付着力や耐久性のために必要となるかぶりの確保などの制約から、断面厚が10cm程度と比較的厚肉板が使われる。

しかし、本研究テーマである土木構造物への適用を主体とした埋設型枠は、材料コスト、フレキシブル性、現場打ちコンクリートとの伸縮性などの適合性、メンテナンスを含めた耐久性などを考えると、薄肉セメント製品が最良といえる。加えて、工場での製品成形性、型枠の運搬や組立、コンクリート打設などに影響する型枠の耐荷性、型枠内に現場打ちされるRCやPCの防食効果、型枠自体の耐久性などが求められるため、10～30mm程度の厚さが妥当となる。なお、現場打ちコンクリートとの一体性確保のための凹凸などの接合層が必要で、自然石やタイルなどの景観仕上げ材先付け層、着色層、模様化層などを設けることも考慮しなければならない。

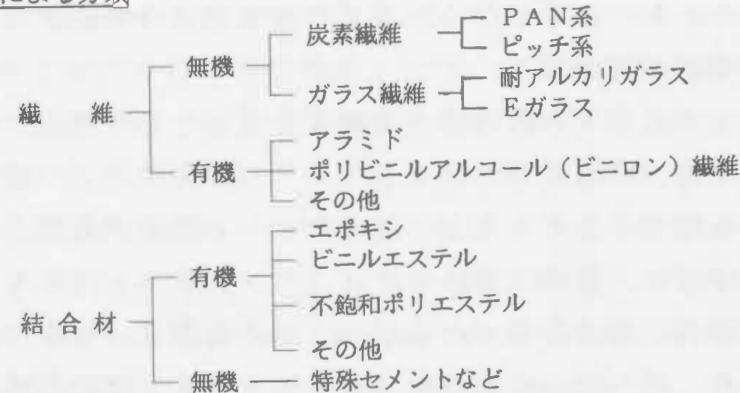
これらの要求性能で、耐荷性としては、曲げ強度、耐衝撃性、弾性係数などが大切となる。これらの品質改善策としては、補強材自体に防食性があり、セメントマトリックスよりも弾性係数の高いステンレス繊維、炭素繊維、ガラス繊維、アラミド繊維、ビニロン繊維などをセメント系マトリックスの補強材として利用することが考えられる。これらの繊維は、コンクリート材料として非常に高価なために少量で補強効果を得たり、薄肉板製造に支障のないようにメッシュ状などの連続繊維補強材として使用するのが適当といえる。しかし、連続繊維には多くの材質、形状などがあり、かぶりがほとんどない状態で使われるセメントマトリ

ックスとの適合性や利用法を、経済性、薄肉板成形性、補強効果、耐久性などから検討する必要がある。なお、セメント系薄肉板への繊維の利用では、その色調、フィラメント（素線）の収束法、耐アルカリ性、耐熱・耐火性、耐候性なども問題となる。

図-2.1および表-2.1は、コンクリート補強材として利用されている連続繊維補強材の分類および各種繊維素材の品質を各々示したものである^{6.3)}。

コンクリート用連続繊維補強材に関する規準類としては、前述した建設省大臣官房技術調査室監修「連続繊維補強コンクリート—諸性質と設計法—」の他、土木学会の「連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用」（1992年発行）があり、「平成8年版土木学会規準 FRP指針」（1996年制定）として連続繊維補強材の品質規格（案）と各種品質試験方法（案）10件が新しく制定されている。これらは、主に繊維を樹脂で固めたFRP製の1次元棒材をPCやRCの補強材とするものだが、2次元補強材についても、吹付けコンクリート補強網、カーテンウォールなどのパネル製品、コンクリートの補修・補強材として利用が進められている。

材料による分類



形状による分類

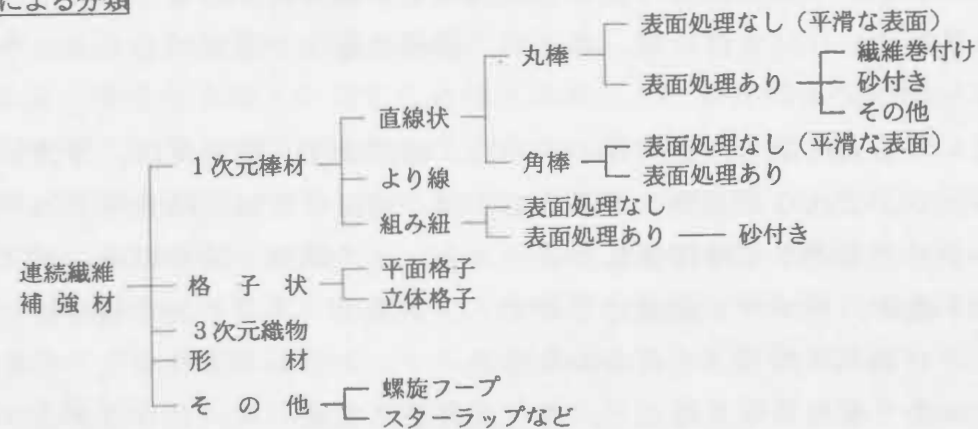


図-2.1 コンクリート用連続繊維補強材の分類

表-2.1 コンクリート補強用繊維素材の性質

諸 元	炭素繊維				アラミド繊維		ガラス繊維		ポリエチレン繊維	ポリビニルアルコール繊維
	PAN系		ピッチ系		ケブラー	テフロン	Eガラス	耐アルカリガラス	テクニロン	クラロン
	高強度	高弾性	汎 用	高弾性						
単繊維直径 (μm)	5~8	5~8	7~20	8~14	12	12	8~12	8~12	50~100	14
密度 (g/cm ³)	1.7 ~1.8	1.8 ~1.9	1.5 ~1.8	1.8 ~2.2	1.45	1.39	2.6	2.27	0.97	1.25 ~1.30
引張強度 (MPa)	3500 ~4500	2500 ~2700	500 ~1200	2450 ~3430	2750	3040	3500	1800 ~3430	1500 ~3500	700 ~1500
引張弾性率 (GPa)	230 ~240	350 ~400	50 ~100	117 ~785	131	70	73	69~74	80 ~100	11~37
伸度 (%)	1.4 ~1.5	0.6 ~0.8	2.0 ~2.5	0.4 ~1.5	2.3	4.4	4.8	2~3	4	7
熱分解温度 (℃)	3000	3000	3000	3000	600	500	800	800	140	240
化学抵抗性	塩酸 硫酸 硝酸 水酸化ナトリウム 海水	◎ ◎ ◎ ◎ ◎	◎ ◎ ◎ ◎ ◎	◎ ◎ ◎ ◎ ◎	× × × ○ ○	○ ○ ○ ○ ○	× × × △ △	— — — ○ —	◎ ◎ ◎ ◎ ◎	◎ ◎ ◎ ◎ ◎

なお、短繊維補強材については、土木学会の「鋼繊維補強コンクリート設計施工指針（案）」（1983年制定）、日本建築学会の「スチールファイバーコンクリート技術の現状」（1984年発行）、日本コンクリート工学協会の「繊維補強コンクリートの試験方法に関する規準」（1984年制定）などが発行されている。

欧米では、従来から金網を使ったフェロセメントに関する研究が盛んで、1970年代には、Aveston, Cooper, Kellyらによるセメント板の連続繊維強化理論（ACK理論）なども発表されており、安全性に問題のある石綿セメント板の代替品として1970年代に Hannantらが開発したフィブリル化したポリプロピレン網状繊維によるNETCEM、鋼繊維補強コンクリートに関する1960年代のRomualdiの補強理論などが有名で、これらの実用化も進んでいる^{6.4), 6.5)}。しかし、高強度・高弾性・高耐食性が期待できる連続繊維補強材をコンクリートに利用する技術は、1991年にACIでもFRP補強材に関する委員会が設置されたが、高強度、施工実績や研究報告の多いわが国が世界の最先端を歩んでいる。

また、防食効果ではイオン、ガス、水分などの腐食因子のしゃへい性、耐久性では耐凍害性、耐薬品性、耐摩耗性、耐候性などが重視される。これらの品質改善策としては、セメント系マトリックスの内部組織を緻密にすることが大切で、ポリマー、シリカフュームなどの超微粒子系の改質材の利用が有効といえる。とくに、ポリマーを用いる場合、かぶりが小さくなる補強材との付着性、薄肉板成形時に要求される流動性、美観や汚れ防止のための表面平滑性、現場打ちコンクリートとの一体性確保に砕石などを媒体として使用したり、景観仕上げ材を利用する場合の接着性なども良好な結果が得られるものと期待できる。しかし、ポリマーは非常に高価で、その種類、利用形態などは多種多様なものがあり、セメントマトリックスとの適合性や利用法を、経済性、薄肉板成形性、耐荷性、耐久性

などから十分に調査する必要がある。なお、力学性状や耐久性では、ポリマーで問題となる温度依存性、耐候性、通常はAE剤を用いる耐凍害性なども検討を要する。

コンクリート混和用のポリマーに関する規準類としては、ポリマーセメントモルタルやポリエステルレジンコンクリートの試験方法に関するいくつかの JIS、日本コンクリート工学協会の「ポリマーセメントモルタルの試験方法に関する規準（案）」（1990年制定）、日本材料学会の「ポリエステルレジンコンクリート構造設計計算指針（案）」（1985年制定）、日本建築学会の「ポリマーコンクリート施工指針（案）」（1987年制定）などがあり、ASTM, ACI, BS, RILEMなどにも各種規定がある⁶⁶⁾。

図-2.2および図-2.3は、ポリマー混和材およびポリマー結合材（液状レジン）の分類で、表-2.2は各種ポリマーコンクリートの性質の一例を示したものである^{67), 68)}。

繊維とポリマーに関しては、プラスチック母材と繊維強化材とによる FRPに関する研究・開発の歴史は長く、実用化も進んでおり、日本材料学会の「複合材料ハンドブック」（1989年発行）などのハンドブック・辞典類を参考にでき、JISなどの規格類も多数ある。しかし、セメントとこれらを組み合わせた研究例は、あまりみられない。

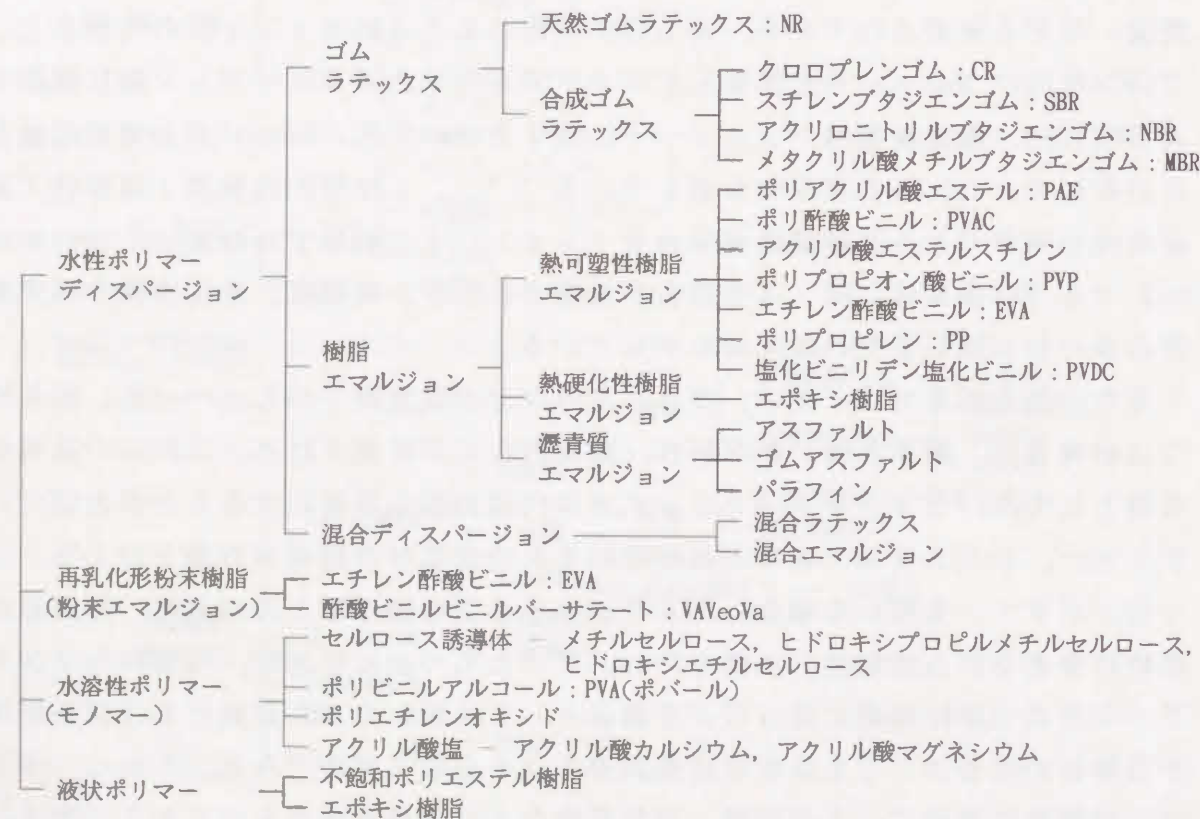


図-2.2 ポリマー混和材の分類

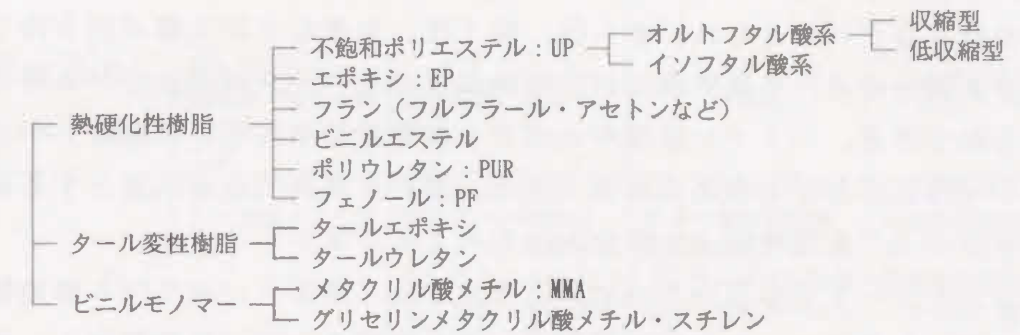


図-2.3 ポリマー結合材（レジンコンクリート用）の分類

表-2.2 各種ポリマーコンクリートの性質の一例

諸 元	普通コンクリート	ポリマー含浸コンクリート	レジンコンクリート	ポリマーセメントコンクリート
圧縮強度 (MPa)	34.3	137	133	37.7
引張強度 (MPa)	2.45	10.3	9.60	5.49
曲げ強度 (MPa)	4.80	17.2	20.6	12.3
弾性係数 (GPa)	24.5	41.2	34.3	13.7
付着強度 (MPa)	0.86	—	>4.4	>4.4
吸水率 (%)	5.5	0.6	0.6	—
耐凍結融解性 (サイクル数/質量減少率, %)	700/25	3500/2	1600/0	—
耐硫酸塩性 (浸漬日数/膨張率, %)	500/0.5	700/0.1	—	—
耐酸性 (対普通コンクリート改善度, 倍)	—	10	>20	4
耐摩耗性 (対普通コンクリート改善度, 倍)	—	5	10	10

これらの補強材や改質材を用いた薄肉セメント製品を埋設型枠として使用する場合には、上述したような型枠自体の品質の他に、型枠と現場打ちされるRCやPCとの長期にわたる一体性や連続性を耐荷性、耐久性などから検討する必要がある。

この一体性を確保するためには、接着剤を媒体とする方法、埋込み金具、トラス筋、立体金網などの金属補強材による方法、型枠の裏面つまり接合面に碎石や砕砂を埋め込んだり、コンクリート製のけたや舗装版の上面のようにほうき目仕上げをしたり、凹凸状のコッターなどを設ける方法などがある。いずれの場合も、使用限界状態下において、接合界面の付着破壊を起こさないことが大切となる。これは、構造物の耐久性や耐荷性のみならず、型枠の剥離落下による第三者影響度を考える上でも重視されなければならない。土木構造物では、荷重自体が大きく、しかも繰返し荷重を受け、断面も大きく、合成床版や合成床スラブのように型枠端部をけたやはりで支持できないことも多くなるので、注意を要する。

また、連続性については、型枠継目部からの現場打ちコンクリートの漏れや腐食因子の侵入などが考えられ、耐久性、施工性、美観などに支障が出るので、目地処理が大切となる、目地処理には、型枠端部のオス・メス形状やゴム材などによる突合わせ接合、シリコン樹脂やエポキシ樹脂接着剤あるいは接着テープなどによるシーリングなどが考えられる。また、型枠を構造的有効断面とする場合は、鉄筋継ぎ手のような型枠同士の結合方法も考える必要がある。

日本コンクリート工学協会が1983年に作成した「海洋コンクリート構造物の防食指針（案）」を改訂した1990年版では、第2種防食法に「防食型わく」を新たに追加して、「防食型わくとは、コンクリート構造物の表面に永久型わくとして用いることによりコンクリート中への腐食因子の侵入を遮断し、コンクリート中の鋼材の防食を目的として製造されたものである。」とし、型枠は、試験によって品質の確認されたもので、工場において製造することを原則とし、内部に打ち込まれるコンクリートとの一体性が保たれるような構造でなければならないとしている。

また、1996年に改訂された土木学会「平成8年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕」でも、具体性はないが、特殊型枠および支保工の条項が新設され、「・・・また、近年ではポリマーセメントモルタル、ポリマー含浸コンクリート、繊維補強コンクリート等により製作され、そのまま部材の一部として使用される型枠や・・・これらの特殊型枠および特殊支保工の使用にあたっては、特に注意しなければならない事項が多いので、それらの注意事項を十分に守らなければならない。」と解説している。この新技術が示方書への取り込まれるきっかけは、土木学会が示方書改訂のために民間企業や団体に対して行ったコンクリートの材料・新技術に関するアンケート調査結果の「技術総覧」で、施工実績の非常に少ない高耐久埋設型枠工法が、①省人化達成率、②耐久性向上率、③省エネ達成率、④成熟度、⑤実績、⑥汎用性・専有性および⑦技術評価の例という7つの評価合計で40点満点中39点と72技術中最も高い判定評価を得たことによるといえる⁶⁹⁾。

このような薄肉断面の高耐久性埋設は、1980年代中頃から、塩害による早期劣化、工場排水・温泉水による化学的侵食、すりへり・凍害作用による物理的侵食など、きわめて厳しい環境条件下における土木構造物の耐久性改善策として、企業を中心として開発が徐々に行われている。

1985年にポリマー含浸コンクリート板(PICフォーム)が砂防ダム越流部の一部に摩耗対策として利用されてから、寒冷地防波堤の凍害防止対策、水路トンネル劣化部の補修・急速施工、大規模海洋橋梁基礎の塩害・摩耗対策など特殊な現場での用いられてきた。また、前述した「民間開発技術審査・証明事業」制度をうけた高耐久性埋設型枠が本州四国連絡橋来島大橋下部工の防食性・美観性向上対策工法として利用されている。

表-2.3 技術審査・証明を行った埋設型枠（公募型制度）

技術名称		PICフォーム	ASフォーム	PCAフォーム	プロテック
依頼者		大成建設・秩父小野田・小沢コンクリート工業	清水建設・麻生セメント	大林組	日本ハーモス
母材		①モノマーとしてメタクリル酸メチル使用	①ビニルエステル樹脂主成分の結合材 ②イソフタル酸系不飽和ポリエステル、ビニルエステル樹脂またはフッ素系樹脂で表面コーティング	①シリカフェウムとスラグ微粉末使用 ②裏面にポリマー層（変性エポキシ樹脂3mm）を浸透一体化	①不飽和ポリエステル樹脂主成分の結合材 ②裏面に再生布（フェルト状）接着
補強材		ステンレスファイバー（SUS 304, 0.3×0.4×15mm）または鋼繊維（φ0.3×15mm）	エポキシ樹脂塗装（0.2mm以上）した立体金網（φ2.6mm）	アラミド繊維ネットおよびビニロン繊維（30mm）	無筋
現場打ちコンクリートとの一体化法		粗骨材埋込み	エポキシ樹脂塗装立体金網（埋設深さ10～15mm）	けい砂による粗面化と埋込みインサートおよびアンカーボルト（SUS304）	防錆処理した鉄板ジベル（塩害地用はステンレス製ジベル）
目地処理法		エポキシ系またはシリコン系樹脂シーリング材	柔軟性エポキシ樹脂、両面ブチル・EPDMシール、変成エポキシシーリング材	ブチルと二成分系シリコンシーリング材	ポリウレタン系シーリング材
諸元	厚さ（mm）	25～40	20～30	28～53	60
	質量（kg/枚）	50～85	76～120	64～122	8～16
	大きさ（m）	0.9×1.8, 1.0×2.0	0.9×1.8	1.5×3.0以下	0.45×0.45, 0.45×0.9
	静弾性係数	34.3～39.2 GPa	19.6～29.4 GPa	29.4 GPa	21.2 GPa
	圧縮強度	147 MPa 以上	78.4 MPa 以上	88.2 MPa 以上	83.3 MPa
	曲げ強度	23.5 MPa 以上	19.6 MPa 以上	7.8MPa以上(引張強度)	14.7 MPa
引張強度		11.8 MPa 以上	9.8 MPa 以上	4.9MPa以上(引張強度)	-
美観対策		着色、模様付け可能	着色、光沢を有す	着色、模様付け可能	自然石模様を有す
備考		一般型；1990年3月公募型；1994年3月（公技審第0504号）	一般型；1994年3月公募型；1994年3月（公技審第0505号）	公募型；1994年3月（公技審第0506号）	公募型；1994年3月（公技審第0507号）

表-2.4 技術審査・証明を行った埋設型枠（従来型制度）

技術名称 (審査・証明番号)	概要・特徴	審査証明依頼者
側溝用GRC製型枠 「KCフォーム」 (技審証第6302号)	耐アルカリ性ガラス短繊維で補強した厚さ6～13mmのコンクリート板。側溝の蓋を打ち込むときのみ使用する目的で作られたもの。1989年認定、以降多数の実績がある。型枠厚さはかぶりとしてのみ有効。	ジェイ・エフ・ビー
ステンレス鋼繊維混入モルタルによる高耐久性埋設型枠 「SEEDフォーム」 (技審証第0607号)	ステンレス鋼短繊維で補強された厚さ30mmのコンクリート板。高さ40mmのリブが付いており、鉄筋のスペーサの役もなす。型枠と型枠との接合面は密着するので型枠の厚さは圧縮材として考慮できる。	前田建設工業
FRPと高強度モルタルの複合部材による高耐久性埋設型枠 「H・Rフォーム」 (技審証第0608号)	イソ系不飽和ポリエステルで表面被覆した厚さ40mmのモルタル版。補強のため鉄網が入っている。内部コンクリートとの付着を高めるため独特の凹凸が付いている。型枠の厚さはかぶりとしてのみ有効。	秩父小野田 ダイドー 小野田

表－２．５ 埋設型枠材における試験・調査の一例（PICフォーム）

審査事項	試験・調査項目	試験方法・確認項目の概要
施工性	施工ができることの確認	調査方法；施工現場にて施工状況の観察 確認項目；運搬方法、パネルの組立および加工性を目視にて確認
耐荷性	力学的特性	試験方法；標準供試体を用いた各種の強度試験 確認項目；圧縮強度、曲げ強度、引張強度および静弾性係数などの測定
	型枠としての特性	試験方法；版の曲げ載荷試験、直接引張試験および衝撃試験 確認項目；曲げ荷重とたわみの関係、伸び能力および衝撃強さの測定
一体性	表面剥離試験	試験方法；埋設型枠を用いて打込んだ部材を用いた建研式接着力試験 確認項目；剥離強度の測定および剥離破壊面の観察
	二面せん断試験	試験方法；埋設型枠を用いて打込んだ部材を用いた二面せん断試験 確認項目；せん断強度の測定および破壊状況の観察
	鉄筋引抜き試験	試験方法；埋設型枠を用いて打込んだ部材の型枠際鉄筋を用いたASTM C 234に準じた鉄筋付着試験 確認項目；鉄筋の付着強度の測定および型枠のかぶりとしての性能の確認
	曲げ載荷試験	試験方法；埋設型枠を用いて打込んだRCはりの4点曲げ載荷試験 確認項目；ひびわれ時耐力および破壊時耐力の測定、破壊状況の観察
	RCはりの曲げ疲労試験	試験方法；埋設型枠を用いて打込んだRCはりの200万回繰返し曲げ載荷試験 確認項目；ひびわれ時耐力および破壊時耐力の測定、破壊状況の観察
	PCはりの曲げ疲労試験	試験方法；埋設型枠を用いて打込んだPCはりの200万回繰返し曲げ載荷試験 確認項目；ひびわれ時耐力および破壊時耐力の測定、破壊状況の観察
	中性化促進試験	試験方法；埋設型枠を40℃、40％RH、CO ₂ 濃度10％の炭酸化促進槽で90日間暴露 確認項目；フェノールフタレイン発色法による中性化深さの測定
耐久性	塩害促進試験	試験方法；埋設型枠を用いて打込んだ部材を55℃熱風乾燥し、飽和食塩水繰返し散布下に210日間暴露 確認項目；塩分浸透量の測定と鋼材腐食状況の観察
	加圧吸水試験	試験方法；埋設型枠を用いて打込んだ部材を1.5MPa圧飽和食塩水中に28日間浸漬 確認項目；吸水量と塩分浸透量の測定
	凍結融解試験	試験方法；埋設型枠を用いて打込んだ部材をASTM C 666に準じて1550回凍結融解繰返し 確認項目；相対動弾性係数の測定および外観の観察
	すり減り試験	試験方法；埋設型枠を回転式すりへり試験機（スパイクタイヤ）で5万回摩耗 確認項目；1万回ごとに摩耗深さの測定
	薬品浸漬試験	試験方法；埋設型枠から切り出した試験片を5％塩酸溶液中に12週間浸漬、また10％硫酸マグネシウム溶液に28週間浸漬 確認項目；質量変化の測定および外観の観察
景観性	耐候性促進試験	試験方法；サンシャインカーボンアーク照射と炭酸ガス槽内に180日間交互暴露 確認項目；色差および光沢の経時変化測定および中性化深さの測定
	凍結融解による表面劣化試験	試験方法；埋設型枠をASTM C 666に準じて1000回凍結融解繰返し 確認項目；外観の観測および相対動弾性係数の測定

この制度で証明された型枠の特徴を、表－２．３および表－２．４に公募型と従来型とに分類して示し、表－２．５には、試験施工の比較的多いPICフォームの試験・調査の項目と方法の例を示す^{70)・71)}。

これらの型枠は、新しい材料を複雑に組み合わせたものであり、高度な複合材料といえる型枠自体の材料単価が非常に高く、その製造法や型枠としての施工法に技術を要し、温度依存性などが物理・化学的に影響するポリマーなどを用いることによる促進耐久性試験と実施工との比較検証、エージング効果なども要求される美観の検証などに未知の領域が多いため、特定の試験施工としてのみ採用されているにすぎない。

また、技術審査・証明を受けたものは、長繊維よりも補強効果が小さいために使用量を多くしなければならない高価なステンレスなどの短繊維を使うもの、耐食性に問題のある金網や耐熱性に問題のある有機繊維を補強材に用いるもの、複数の補強材使用、樹脂層、フェルト層あるいはジベルの設置などで成形に手間を要するもの、高価で多量のレジン結合材の他にもフィラーや各種添加剤などが必要で、骨材にも乾燥やカップリング剤などでの表面処理を施して専用機で成形し、硬化収縮や温度伸縮が大きくて耐火性などに劣るもの、熱風や赤外線での乾燥、真空脱気や揮発性モノマーによる含浸、加熱や放射線による重合などの特殊技術を要して作業者の健康も懸念されるものなど、製造技術や材料面などで検討すべき点が多い。

建築用の埋設型枠工法には、ステイシエルシステム、HMCスーパーフォーム工法、ユニコラム・ユニビーム工法、TAS Form工法、HPF打込み型枠工法、NALC型枠工法、HOF工法、オリフォーム・プレカラム工法、DECF工法、ACE-Form工法、FRC化粧永久型枠工法、MOOTEC工法などがあり、建設省が設けた「鉄筋コンクリート造建築物の柱・はり型枠の施工合理化工法」（1992年）として技術評価を受けているものも多いが、主に合理化施工用であり、土木用埋設型枠と同様な問題の他に、無筋であったり、現場打ちコンクリートとの一体性確保のための接合面加工や連続繊維補強材などの配置に問題があり、特殊装置を要する押し出し成形法やプレス成形法を採用しているものもある。

したがって、より安価で、型枠の製造やその利用法が容易な汎用性に富む高耐久埋設型枠の開発や、さらに多くの実験や施工実績を蓄積することで施工や設計の標準化を進めることが大切となる。

本研究は、セメントを主結合材とし、これに連続繊維やポリマーを有効利用して薄肉セメントモルタル板を作製し、これを高機能埋設型枠として適用するためのものである。前述したように、連続繊維、ポリマー、埋設型枠といった個々の研究は近年盛んにはなっているが、これらを効果的に複合化させた研究はみられず、熱帯材合板型枠からの転換材としての耐荷性やフレキシブル性などはもとより、耐久性や美観などの機能性、経済性、型枠製造技術などを考慮しながら、汎用性の高い埋設型枠を開発することで、今は仮設材でしかない型枠が、かぶりや構造面で有効断面化できたり、環境、景観、労働などにかかわる社会的ニーズに応えられる建設技術となることが期待される。

第3章 モルタル改質用ポリマー混和材料の検討

3.1 概説

コンクリート構造物は、元来 100年程度の供用に耐えられるのが正常な状態である。コンクリートの歴史が浅いわが国でも、広井勇博士の指導で1897年から建設の始まった小樽北防波堤、田邊朔郎博士が携わった琵琶湖疎水に架かる1903年完成のメラン式弧形RCけた橋梁、1904年に建設された山陰線島田川橋梁など、建設されて 100年近くになる構造物が現在も利用されている事例は多い。

しかし、わが国は海洋国・火山国であり、塩分、アルカリ、硫酸塩類などを含んだ海水、地下水、土壌などの作用を受ける厳しい環境にさらされる構造物が多く、気象変化も複雑で、骨材需要の増大や河川管理の強化などによる良質河川産骨材の枯渇化に伴って海砂や砕石などが大量使用され、合理化施工を目的としたポンプ施工が普及し、工事の分極化による技術者の不足や管理体制の悪化などもあり、これらの要因が絡み合ってコンクリート構造物の早期劣化が問題となっている。

鉄筋の塩分腐食やアルカリ骨材反応などに象徴されるコンクリート構造物の劣化は、素材の品質に欠陥があったり、設計どおりの施工が行われなかった場合に急速に進行し、早ければわずか数年で補修・補強が不可能に近い状態にもなる。

コンクリートという構造材料を、これらを用いてつくった構造物の劣化という側面からみると、次のような特性が問題となる¹²⁾。

①コンクリート中のセメント硬化体部分では、長期にわたって複雑な化学反応が進行するが、その反応のプロセスと反応生成物は、セメントのアルカリ、塩化物の存在、環境条件などによって著しい影響を受ける。

②セメント硬化体部分には0.01~10 μ mにわたる孔径の毛管孔隙が存在し、これを通じて外部からの酸素、二酸化炭素、水分、塩化物イオンなどの拡散・浸透が行われるが、これと同時に、種々の溶質成分を含む細孔溶液の移動が内部において行われる。

③細孔溶液の成分は、その大半がNa⁺、K⁺、OH⁻などのアルカリイオンによって占められ、そのpHは12~14の範囲にある。

④コンクリートの体積の70~80%を占める骨材は、天然の岩石からなっている。

⑤コンクリートの組織は、現場の製造条件によって左右される。

コンクリートが早期に劣化するのは、構造物が製造の時点で何らかの欠陥を有

しているからである。例えば、許容量を越える塩分やアルカリ、反応性物質を多量に含む骨材、毛管孔隙の多いセメント硬化体、施工不良による空洞やかぶり不足などである。

したがって、使用材料の入念な選定、設計に沿った密実な施工、管理体制の徹底などがコンクリートの信頼性回復に必須の条件となる。

しかし、セメント硬化体が、イオン、ガス、湿度、温度などの条件によって変化し、微細な連続空隙を有しているためにイオン、ガス、水分などが移動するので、厳しい環境にさらされるコンクリート構造物では、何らかの防食法が必要となる。日本コンクリート工学協会が発行した「海洋コンクリート構造物の防食指針(案)―改訂版―」では、コンクリートのみで対処する第1種防食法とこれ以外の第2種防食法とを取り上げている。前者は、水セメント比、塩化物含有量、かぶり、ひびわれ幅などの材料や構造細目の条件を厳しくするとともに、欠陥のない均等質で密実な施工を行うもので、後者は次のような積極的手法によるものである。

①鋼材表面を防食性材料によって被覆する方法

・非金属材料による被覆

；エポキシ樹脂塗装鉄筋、アンボンドPC鋼材の樹脂系材料による被覆など

・金属材料による被覆

；亜鉛メッキ鉄筋、クラッド鉄筋など

②コンクリート層で腐食性成分の侵入を防ぐ方法

・コンクリートの表面被覆

；防食型枠、樹脂ライニング、PCCライニング、レジンモルタルライニング、PIC(表面含浸)、樹脂コーティング、塗装など

・コンクリート層自体を有害物が通過しにくくする方法

；PIC、PCC、ワックス混入コンクリートなど

③電流によって鋼材の電位を変化させて防食する方法

；電気防食

④鋼材自体の防食性能を高める方法

；耐塩性鋼など

⑤腐食しない補強材を使用する方法

；FRPロッドなど

最近では、電気防食と同様に直流電流を使用し、イオンを移動させるデサリネーションや再アルカリ化などの検討もされている。

コンクリート構造物の耐久性向上は、本研究テーマである永久埋設型枠の重要な要求性能である。本研究では、イオン、ガス、水分などといった鉄筋コンクリートの腐食因子を遮へいし、衝撃などの作用を受けた場合に生じる変形エネルギー

ーを吸収する能力を型枠に寄与するため、加えて薄肉板にメッシュを配する永久型枠では、モルタルのひびわれ抵抗性やメッシュとモルタルとの付着性などの向上、構造物表面の意匠化や平滑化などへの対応、現場打ちコンクリートと一体化させるための碎石埋込みなどによる接合面処理、現場打ちコンクリート打設前の型枠への吸水処理の簡略化などを念頭に入れて、永久埋設型枠用のセメントモルタルにポリマーを採用した。

セメント混和用ポリマーの使用法としては、セメントを用いずに液状レジンのみを結合材とするレジンモルタル、モルタルの硬化乾燥後にモノマーを含浸して重合させるポリマー含浸モルタルおよび通常のモルタルと同様な方法でポリマーをプレミックスさせるポリマーセメントモルタル (PCM) の3種に大別できるが、特殊な技術や設備が不要で、高価なポリマーの使用量も少なくできるPCMを採用した。さらに、ゴムラテックスや樹脂エマルジョンからなる水性ディスパージョン、再乳化粉砕樹脂、水溶性ポリマー、液状ポリマーなどに分類されるPCM用ポリマーの中から、腐食因子の遮へい性に加えて、数十mm厚の薄肉モルタル板中にメッシュを配するための作業性などを考慮し、球状超微粒子ポリマーを界面活性剤で水に分散させた水性ディスパージョンに着目し、ポリマー粒子には、一般的なSBR (スチレンブタジエンゴム) 系、EVA (エチレン酢酸ビニル) 系およびPAE (ポリアクリル酸エステル系) 系の3種と、最近開発されたSA (スチレンアクリル) 系のものを採用した。

水性ディスパージョンを使用したモルタルでは、球状超微粒子ポリマーや界面活性剤の働きで流動性や材料分離抵抗性が高まり、ポリマー超微粒子による細孔充てん、乾燥や加熱、セメント水和の進行による圧力などによる凝集および造膜などの作用で、ひびわれ抵抗性、遮へい性、化学抵抗性、接着性、はだ面などの改善効果が期待できる^{73, 74)}。

細孔を充てんするマイクロフィラー効果のある超微粒子混和材料については、平均粒径が数十 μ m程度のセメント粒子と比べると1/100程度で、ポリマーと同程度の粒径をもつ超微粒子副産物のシリカフュームについても、ポリマー混和材と同程度の使用量で、モルタルの材料分離を抑制し、界面活性剤である高性能減水剤 (高性能セメント分散剤) との併用で、諸強度や水密性を改善すること、あるいは即時脱型製品用コンクリートのはだ面も良好となることなどを、筆者らは過去の実験で得ており、数編の研究論文を発表している⁷⁵⁾。

シリカフュームでは、長期の湿潤養生下でセメント中のアルカリと化学的なポゾラン反応を生じるが、セメント混和用ポリマーでは、セメントの水和でモルタル組織がある程度強硬になった後の乾燥作用で、凝集や造膜化が進み、モルタルの遮へい性や接着性などの改善に寄与するポリマーフィルムが形成される。この現象には、セメント水和による結晶化圧、熱などの物理作用も有効と考えられる。

本章では、4種の水性ポリマーディスパージョンだけでなく、使用量を少なくできるという点で経済的な変質メラミンからなる水溶性ポリマー系の混和剤なども取り上げ、高価なポリマーやセメントの節減、乾湿、炭酸化、硬化などに伴う体積変化の抑制などの目的に加えて、メッシュ積層薄肉板という成形上の制約から細粒が要求され、天然砂保護や副産物有効利用などをも考慮した天然砂、砕砂およびフェロニッケルスラグ砂の3種の骨材などを使用し、製造したモルタルの空気連行性、流動性、材料分離性、力学的な物性、耐久性、美観などを調査した。

ここで、フェロニッケルスラグ砂は、ステンレス鋼やニッケル合金の原料となるフェロニッケルの製錬時に生成する熔融スラグを水や空気中で急冷してできる副産物で、通常の天然砂よりも比重が大きく強硬で、ロータリーキルンから排出したスラグを水冷すると細粒になるという特徴を有する⁷⁶⁾。この利用法については、土木学会から「フェロニッケルスラグ細骨材コンクリート施工指針 (案)」 (1994年) が発行されている。また、海砂は一般に細粒ではあるが、塩化物やアルカリなどを有し、瀬戸内海などで行われている大量採取が、海岸地形や生態系に及ぼす悪影響を指摘されているために対象外とした。

樹脂系コンクリートの試験・品質規格や施工指針の類には、ポリマーセメントモルタル・コンクリートおよびポリエステルレジンコンクリートに関するJIS、日本コンクリート工学協会 (JCI) による「ポリマーセメントモルタルの試験方法 (案)」などがあり、他にも、日本材料学会、日本建築学会、ASTM、BS、DIN、ACI、RIREMなど、日本、アメリカ、イギリス、ドイツなどで規格化が進んでいる。本研究における実験では、これらの規格を一部取り入れたものもあるが、連続繊維メッシュで補強する高流動ポリマーセメントモルタルという特殊性があり、規格や指針は全般的に利用しづらく、これらを含めて様々なコンクリートに関する試験方法をアレンジして評価する手法を多く取り入れている。

3. 2 フレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリートの作製

(1) 序説

ここでは、永久埋設型枠への適用を考えたモルタル、およびモルタルとの性能比較あるいはモルタル板を埋設型枠として一体化させる現場打ちのコンクリートを製造する際に使用した材料、配合、練りまぜ方法など、本論文の各章における実験で共通しているものの説明を行う。したがって、以下の章ではこれらの説明を省略あるいは簡素化する。

(2) 使用材料

本研究で、埋設型枠用モルタルに使用したポリマー混和材料およびモルタル用骨材の品質を、表-3.1および表-3.2に各々示す。

表中のR, VおよびAは、各々SBR, EVAおよびPAEを主成分とする標準的なセメント混和用水性ポリマーディスパージョンで、SA系ポリマーのSは、最近開発された水中養生可能型水性ポリマーディスパージョンである。また、FとMの2種は、メラミンを変性した水溶性ポリマーを主成分とした白色粉末で、セメント粒子の分散や水和促進のため、セメント質量に対して1%程度の使用が推奨されている混和剤である。このFは減水性・分散性強化型で、Mは粘度調整型であり、ともに使用量の少ない粉末のため、練りまぜ水にあらかじめ溶かし込んだ状態で使用した。なお、PAE系ポリマーのPは、モルタル用ではなく、次章からの実験で使用するメッシュ状繊維補強材の被覆保護やフィラメント（素繊維）を収束するためのものである。

ポリマー混和材を使用するモルタルには、界面活性剤系およびシリコン系の2種の消泡剤を用いた。ただし、両者の消泡効果を比較検討した結果、界面活性剤系の有効性が確かめられたので、この比較実験以外はこの消泡剤のみを使用した。

表-3.1 実験で使用したポリマーの品質

略号	形態	主成分	不揮発分(%)	平均粒径(μm)	造膜温度(℃)	その他(用途など)
R	乳白色水性ディスパージョン	SBR系	55	0.2	0	1:1系混和材
V	乳白色水性ディスパージョン	EVA系	45	0.7	0	1:1系混和材
A	乳白色水性ディスパージョン	PAE系	50	0.3	0	1:1系混和材
S	乳白色水性ディスパージョン	SA系	50	0.2	50	1:1系混和材
P	乳白色水性ディスパージョン	PAE系	40	0.3	20	1:1系集束材(メッシュ用)
F	白色水溶性粉体	メラミン系	95	—	—	減水剤(セメント分散型)
M	白色水溶性粉体	メラミン系	95	—	—	減水剤(分離低減型)

表-3.2 モルタルに使用した骨材の品質

略号	種類	表乾比重	吸水率(%)	粗粒率
N	天然砂(湖砂)	2.55	1.20	1.75
C	砕砂(けい砂)	2.60	0.50	1.75
K	砕砂(けい砂)	2.60	0.50	1.20
S	フェロニッケルスラグ砂	3.13	0.30	1.80

モルタル用の骨材には、細粒砂として入手可能な天然砂(湖砂)、砕砂およびフェロニッケルスラグ砂の3種を用いた。使用した天然砂は琵琶湖であり、今後採取できない状況になる可能性が高いため、各種産業用に出回っている砕砂製品のけい砂と、産業副産物のフェロニッケルスラグ砂を主として使用した。細粒砂の選定理由は、上述したようにメッシュを数枚積層する薄肉モルタル板の成形性の他に、板状コンクリート製品で一般的な縦打ち成形法をこの薄肉板の製造に採用する可能性があるためである。

モルタル用のセメントには、早強ポルトランドセメントを用い、強度発現性の評価用に普通ポルトランドセメントも一部使用した。

コンクリートの使用材料は、普通ポルトランドセメント、吉野川産川砂(表乾比重; 2.57, 吸水率; 1.6%, 粗粒率; 3.10)、多少頁岩が混入している阿讃山系の砂岩砕石(表乾比重; 2.56, 吸水率; 2.1%), 標準的なAE剤などである。

なお、モルタルおよびコンクリートの練りまぜ水は、上水道水とした。

(3) 配合

モルタルの配合は、ディスパージョン中の不揮発分量あるいは固形分量といえるポリマー量をP、セメントをC、骨材(砂)をS、および水をWとした質量で表示する。ここで、ポリマーによるモルタル改質効果に最も影響するポリマー結合材比: $P/(C+P)$ を高くすると、材料コストが増大するだけでなく、材料分離や硬化不良を招くことなどが予備実験で判明したため、これをやや小さめの0.10とし、砂結合材比: $S/(C+P)$ は1.0~1.5とした。また、流動性評価に使用した「PC(プレストレストコンクリート)グラウト試験法」(JSCE-F531)のJA漏斗による流下時間を一定とする水結合材比: $W/(C+P)$ は0.40~0.55程度で、Pに対する消泡剤使用量は質量比率で1%とした。

目標としたJA漏斗流下時間は、メッシュの種類、モルタル供試体の寸法などによって多少異なるが、メッシュを配した薄肉板用の型枠にモルタルを、振動や加圧などの外力を加えない状態で充てんできる範囲で設定した。高流動のPCグラウト用で吐出管径の比較的小さなこの漏斗を採用した理由は、永久埋設型枠用に、メッシュサイズが数mm~十数mmのメッシュを複数枚配する数十mm厚の薄肉幅広モルタル板を製造する必要があるため、場合によっては、寸法精度、表面仕上げ、作業スペースなどに有利な板状製品の製造法で、工場で一般的に使用されている縦打ち成形法を採用することもあるため、メッシュなどが移動しないように振動締め込みが不要で、材料分離することなくメッシュの隙間や型枠の隅にまで流れ込むだけの高い流動性が要求され、さらにメッシュサイズやモルタル用骨材の粒径などを考えてのことである。

また、モルタルの空気量は、次節で検討しているが、ポリマーの使用で連行される空気泡が非常に多く、その量、寸法、安定性などの管理の難しさ、工場製品で一般的な蒸気養生などの促進養生での悪影響などが懸念されるため、場合によっては凍結融解抵抗性やワーカビリティの改善に有効となることもあり得る連行空気ではあるが、本研究では消泡剤を利用して目標空気量を0%～1%に抑えた。

なお、コンクリートは、土木学会「コンクリート標準示方書」の耐久性などに関する諸規定を考慮し、スランプを8cm、空気量を6%としたAEコンクリートで、W/Cは45%と60%の2種とした。ただし、薄肉埋設型枠への適用を考えたモルタルとの比較実験用の供試体寸法を考慮し、粗骨材の最大寸法を20mmと若干小さくするとともに、一部の実験ではこれを15mmとした。

表-3.3は、実験で使用したモルタルおよびコンクリートの基本配合である。ただし、実験を行った期間が長いので、材料入手の時期により、比重などの品質が若干変動しており、また、20℃を基準とした練り上がり温度が季節によって多少変動したため、実験項目によって単位量などに多少の差異がある。

表-3.3 モルタルおよびコンクリートの基本配合

シリーズ	略 号	コンシステンシー	空気量 (%)	P/(C +P)	S/(C +P)	W/(C +P)	単 位 量 (kg/m³)				
							W	C	P	S	G
A	PL0M01K45	20～30 s	0～1 (JA漏斗)	0.00	1.00	45	391	869	9	869	0
	A10M01K36			0.11		36	322	806	98	895	0
	A20M01K30			0.21		30	269	719	187	898	0
B	PL0K55	30～60 s (JA漏斗)	0～1	0.00	1.00	55	439	799	0	799	0
	R10K55			0.10		55	417	682	76	757	0
	V10K50			0.10		50	397	715	80	794	0
	A10K45			0.10		45	371	743	83	826	0
	S10K40			0.10		40	343	772	86	858	0
C	PL0K55	30～60 s	0～1 (JA漏斗)	0.00	1.00	55	439	799	0	799	0
	F01K47			0.01		47	401	853	9	853	0
	M01K49			0.01		49	411	834	8	834	0
D	S10N45	60～90 s	0～1 (JA漏斗)	0.10	1.50	45	317	634	70	1056	0
	S10C45					45	319	638	71	1065	0
	S10S40					40	317	714	79	1190	0
	C 6 0	8 cm	6	0.00	—	60	176	293	0	825	893
	C 4 5	(スランプ®)	6	0.00	—	45	185	411	0	720	880

注) 配合を示す略号の英字はモルタル用のポリマー混和材と骨材(砂)、および数字はポリマー結合材比と水結合材比を表し、シリーズBの一部とDのモルタルには早強セメント、および他は普通セメントを用い、Dのコンクリートは碎石、川砂およびAE剤を用いている。なお、使用量の少ないポリマー(F, M)および消泡剤は外割で配合計算し(ただし、FとMは単位量Pを含む)、単位量は各材料の出荷時のロットによる比重などにより、実験項目で若干変動する。

(4) 練りませ

モルタルの練りませは、ホバート型ミキサ(容量; 7ℓ)を用いて全材料一括投入法で行った。ミキサ専用ボールに砂、セメント、水および消泡剤を添加したポリマーを投入し、練りさじでこれらを軽くかき混ぜてからミキサを1分間攪拌させ、一旦ミキサを止めてボールの縁や羽根などに付着した材料を練りさじでかき落とし、さらに攪拌を1分間行って排出する手順でモルタルを製造した。練り上がったモルタルは、直ちに「PCグラウト試験法」(JSCE-F531)のJA漏斗による流下時間および空気量を測定した。なお、空気量は、圧力法(モルタル用エアメータ; 容量1ℓ)および重量法(容器容量; 0.4ℓ)で行ったが、両者の結果に明瞭な差異はみられなかったもので、主に圧力法を使用した。

コンクリートの練りませは、水平2軸強制練りミキサ(容量; 50ℓ)を用い、細骨材、セメントおよびAE剤を添加した水を投入して1分間攪拌してモルタルとした後、粗骨材を投入してさらに1分間攪拌して練り板に排出する方法で行った。練り上がったコンクリートは、品質管理用として、直ちに練り上がり温度、スランプ(JIS A 1101)および空気量(JIS A 1128)を測定した。

3.3 モルタルの空気連行性と流動性

(1) 序説

球状超微粒子ポリマーを界面活性剤で水に分散させた水性ディスパージョンをモルタルに使用すると、界面活性剤の分散効果や球状微粒子であるポリマーのボールベアリング作用でモルタルの流動性は高まるが、空気泡が多量に連行される懸念がある。微細で独立した球形の気泡を数%の容積で連行したコンクリートやモルタルは、凍結融解抵抗性やワーカビリティが高まるが、気泡径が大きい場合や、その量が多すぎる場合には、耐久性や力学性状を大きく損なう。また、工場製品で多用されている蒸気養生などの促進養生を行うと、空気泡が加熱によって大きな体積変化を起こし、モルタルの内部組織に弊害をもたらす懸念もある。したがって、塗料、製紙、樹脂、ゴム、食品などのポリマーを多用する化学系の分野で利用されているように、シリコン系、油脂系、界面活性剤系などの消泡剤をポリマー混和材と併用する必要がある、その効果を検討をしなければならない。

(2) 実験の概要

本実験では、PAE系ポリマーを混和したフレッシュモルタルの空気連行性を測定するため、前節で説明した圧力法あるいは重量法を採用し、界面活性剤系とシリコン系の2種の消泡剤を使用した。

また、SBR系、EVA系、PAE系およびSA系の4種のポリマー混和材や、天然砂（湖砂）、砕砂（けい砂）およびフェロニッケルslag砂の3種の細粒骨材などを使用したモルタルの流動性も、前節で説明した「PCグラウト試験法」のJA漏斗流下時間を測定した。

これらの、試験結果には、2つ以上の測定値の平均値を採用した。

なお、モルタル流動性に影響する骨材表面の形状観察には、焦点深度が深くて試料の凹凸観察に優れた走査電子顕微鏡を使用した。観察用砂試料は、電気炉で強制乾燥(100℃)させた後に白金-パラジウムで導電性を与える表面コーティング（スパッタリング）を施した。なお、走査電子顕微鏡は、公称分解能4.0nm(30kV, WD;8mm, 真空二次電子像)で、半導体型検出器（2分割アニュアル型）を有する操作性に優れた汎用型高性能機である。その外観を写真-3.1に示す。

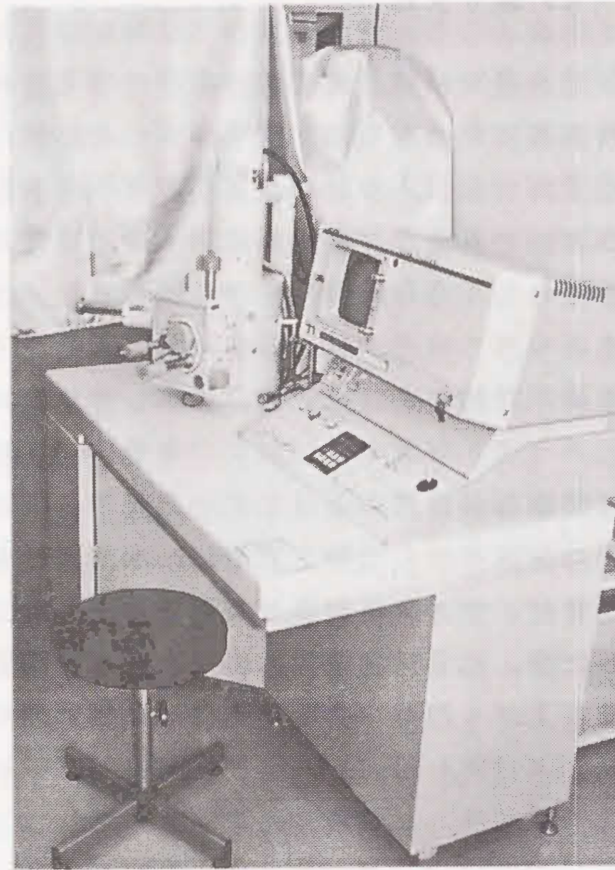


写真-3.1 走査電子顕微鏡の外観

(3) 実験の結果と考察

本実験では、PAE系など各種の水性ポリマーディスページョンを使った高流動モルタルを通常のモルタルミキサで練り混ぜたが、使用材料の種類を限定し、ポリマー結合材比の基準を0.10と小さくしたためか、練り混ぜに材料分離などの支障はみられなかった。しかし、消泡剤を使用しないポリマーセメントモルタルには、比較的大きな空気が多量に連行され、その量も時間経過によって減少することが確かめられたため、界面活性剤系とシリコン系の消泡剤を使った場合の空気量試験で得られた結果を図-3.1に示す。

この結果より、0.10程度のポリマー結合材比でも、消泡剤を使用しない場合、練り混ぜ直後に10%前後の空気量が導入され、30分経過後には数%減少することがわかる。セメント混和用ポリマーディスページョンを用いたモルタルに空気が多量連行される原因は、ディスページョン中の界面活性剤によるものと推測できる。また、モルタルにおける細粒砂、セメント、ポリマーなどの構成粒子の寸法や形状などにも関係するのではないと思われる。

しかし、界面活性剤系あるいはシリコン系の消泡剤をポリマー不揮発分量に対して0.4~1.2%使用することで、空気量を抑制して安定化できることがわかる。また、消泡剤としては、シリコン系よりも界面活性剤系の方が、使用効率が高く、空気量も1%程度に抑えることができ、本研究における他の実験では、界面活性剤系消泡剤のみを使用している。

モルタルの基本配合を示した表-3.3にあるコンシステンシーの条件や水結合材比などから、EVA系、PAE系およびSA系のポリマーの使用で、モルタルの流動性が高まり、これらを用いないプレーンモルタルに比べ、同程度のJA漏斗流下時間を得るための水結合材比を低く設定できることがわかる。また、Cシリーズでは、使用量の少ないポリマー系減水剤にも良好なモルタル流動性の改善効果があるといえる。

同様に、表-3.3のコンシステンシーや水結合材比、および水結合材比を変化させた場合のJA漏斗流下時間を示した図-3.2で、JA漏斗流下時間を一定とした場合の水結合材比、および水結合材比を一定とした場合のJA漏斗流下時間から判断すると、フェロニッケルslag砂モルタルの流動性が最も高く、ついで砕砂モルタル、天然砂モルタルの順となることがわかる。

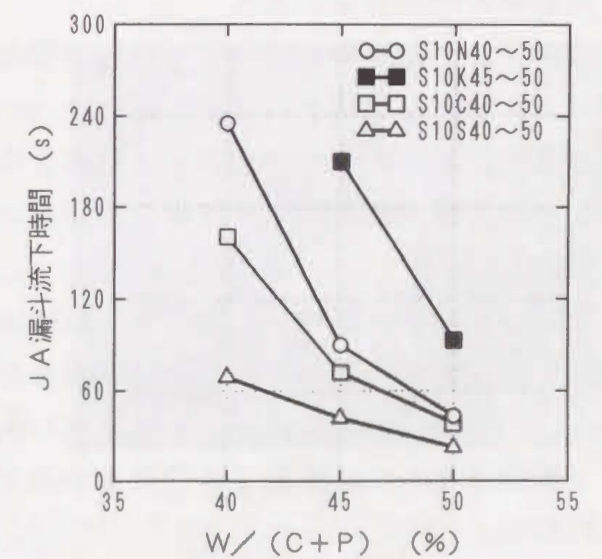
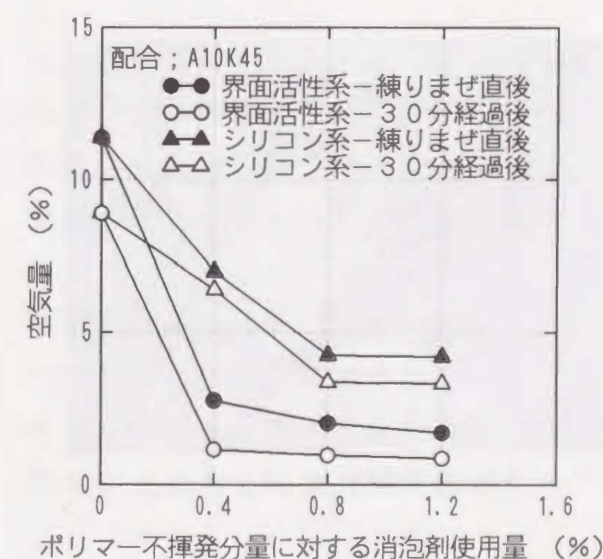


図-3.1 モルタルの空気量

図-3.2 モルタルのJA漏斗流下時間

これは、砂の比重や形状などの影響によると考えられ、使用するポリマーが同じ場合、モルタル板の成形に適する基本配合をJA漏斗流下時間で管理するとすれば、表-3.3のDシリーズにみられるように、単位水量はいずれの骨材でも同程度となるといえる。

走査電子顕微鏡観察で得られた各種砂の形状を写真-3.2に示す。これより、湖砂は、複雑な凹凸などの表面形状を有しており細かな粒には角張りも多いこと、フェロニッケルスラグ砂は、砕砂に比べて鋭い角張りがあるものの表面はガラス状で滑らかなこと、比較用の川砂は丸みがあるが、海砂には角張りが多いことなどが確認できる。これらのことや比重などが、モルタルの流動性に関与するものと思われる。また、凹凸のある骨材の表面観察には、焦点深度の大きい走査電子顕微鏡が有効といえる。

(4) まとめ

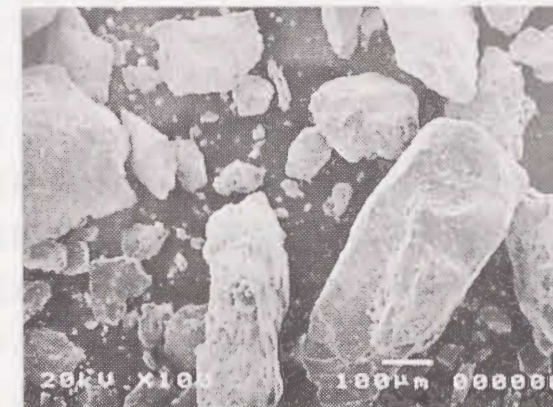
モルタルの空気連行性と流動性に関する本検討結果を以下に要約する。

①PAE系などの水性ポリマーディスパージョンを混和する高流動モルタルは、通常のモルタルミキサで容易に製造可能であるが、モルタルに比較的大きな空気が多量に連行され、その量も時間経過によって減少する不安定さを有しており、界面活性剤系、シリコン系などの消泡剤を使って空気量を抑制する必要がある、その効率は界面活性剤系のものが高い。

②EVA系、PAE系およびSA系のポリマーの使用で、モルタルの流動性が高まり、同程度の流動性を得るための水結合材比を低く設定でき、この現象は、PAE系やSA系などのアクリル系ポリマーで顕著で、ポリマー系減水剤にも良好なモルタル流動性の改善効果がある。

③セメント混和用ポリマーの種類や使用量を一定としたモルタルの流動性は、フェロニッケルスラグ砂が最も高く、ついで砕砂、天然砂（湖砂）の順となるが、これは、砂の比重や形状などの影響と考えられ、モルタル板の成形に適する基本配合をJA漏斗流下時間で管理した場合には、単位水量はいずれの骨材でも同程度となる。

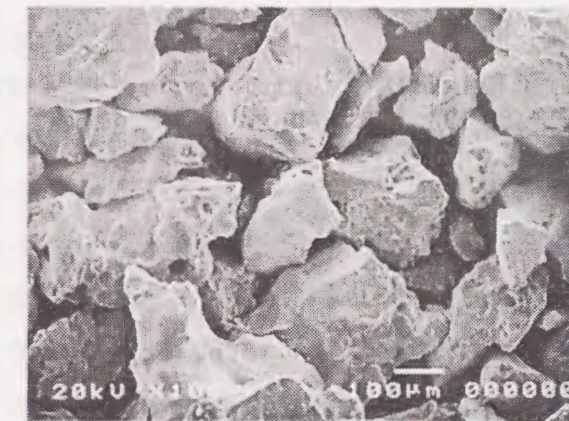
④砂の表面形状観察には走査電子顕微鏡観察が有効で、湖砂、海砂および川砂といった天然砂には細かな粒子に角張りが多く、表面形状も複雑で、フェロニッケルスラグ砂は、砕砂に比べて角張りは鋭いが表面はガラス状で滑らかであることが確認され、これらのことや比重などがモルタルの流動性に関与するものと思われる。



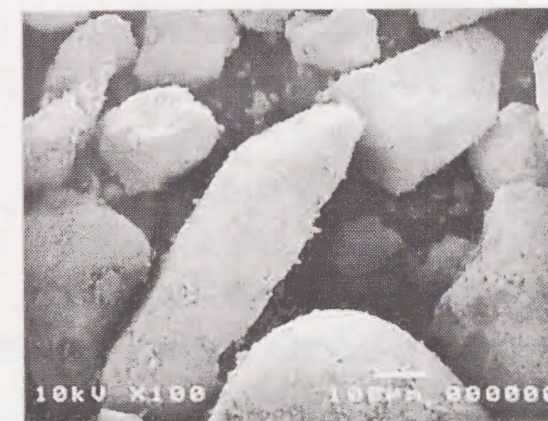
(1) 天然砂（湖砂）



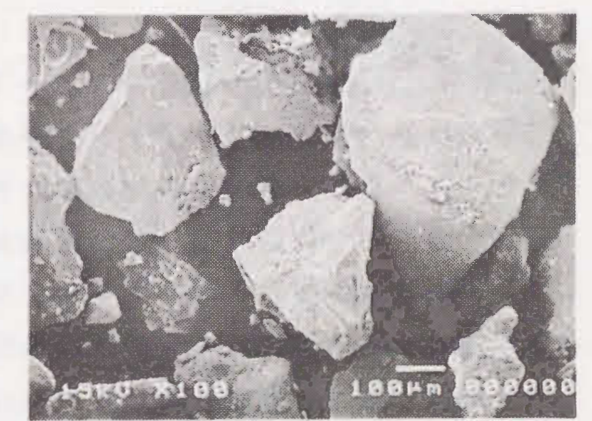
(2) 砕砂（けい砂）



(3) フェロニッケルスラグ砂



(4) 天然砂（川砂）



(5) 天然砂（海砂）

写真-3.2 走査電子顕微鏡 (SEM) による砂の形状

3. 4 モルタルの材料分離性

(1) 序説

球状超微粒子ポリマーを界面活性剤で水に分散させた水性ディスパージョンをモルタルに使用すると、多量に混入される超微粒子の働きでモルタルの材料分離抵抗性が高まるといわれている。メッシュを配する薄肉板の成形性から、高い流動性が要求される永久埋設型枠用モルタルでは、耐久性や美観に悪影響のある材料分離を生じる恐れがあり、ポリマーによる材料分離抵抗性の程度を把握するとともに、板状コンクリート製品で一般的な縦打ち成形法が、永久埋設型枠製品にも利用可能か検討する必要もある。

(2) 実験の概要

高い流動性を有し、細粒砂を使用したモルタルの材料分離を検討するため、PCグラウト試験法 (JSCE-F531) のポリエチレン袋 ($\phi 50 \times 200\text{mm}$) でブリーディング率を求めた。

また、 $0.9 \times 1.8\text{m}$ あるいは $1 \times 2\text{m}$ が標準寸法となるであろう埋設型枠板の工場での縦打ち成形法を想定し、 $\phi 50 \times 1000\text{mm}$ 円筒容器を型枠としてモルタルを流し込み、作製した円柱モルタルから $\phi 50 \times 100\text{mm}$ 円柱供試体を切り出して、打込み高さ位置における圧縮強度を調査した。

なお、ブリーディング率では2つの測定値の平均値、および圧縮強度では3つ以上の測定値の平均値を試験結果とした。

(3) 実験の結果と考察

コンクリートにブリーディングが適量あると、建築工事での表面こて仕上げ、水分やアルカリガスなどの除去による化粧仕上げや居住性などに好都合となり、余剰水の排出で乾燥収縮などが低減するなどの利点もある。しかし、土木工事では、連続空隙が生じるために、コンクリートの寸法精度、継目の一体性、強度、耐久性および水密性、さらに鉄筋の付着性や腐食性などを大きく損なう可能性の高いブリーディングを敬遠している。

各種の実験シリーズで測定したモルタルのブリーディング率を、図-3.3に示す。この図中にある3つのグループ間で、試験実施時期、使用材料、コンシステンシーなどに多少の差異があるために相互の絶対的比較はできないが、個々のグループ、あるいはグループ間の相対的比較において、ポリマーを使わないプレ

ーンモルタルでは、高いブリーディング率を有するものの、SBR系、EVA系、PAE系およびSA系の水性ポリマーディスパージョンの使用で、これが著しく抑制され、ポリマー系の混和剤にも良好なブリーディング抑制効果があることがわかる。

打込み高さを1mとしたモルタル円柱の各打込み高さ位置での圧縮強度を示した図-3.4より、打込み高さ位置による圧縮強度の変化は、天然砂や砕砂に比べて比重の大きいフェロニッケルスラグ砂を使用したモルタルで顕著となるが、いずれの砂を用いたポリマーセメントモルタルでも、1m程度の打込み高さでは材料分離の傾向がみられるので、パネル状の永久型枠の成形は、縦打ち法よりも平打ち法が良く、砕砂を使って縦打ち成形法を採用する場合は、埋設型枠板の打込み方向の寸法を短くするなどの対処が必要といえる。

(4) まとめ

モルタルの材料分離性に関する本検討結果を以下に要約する。

- ①SBR系、EVA系、PAE系およびSA系の水性ポリマーディスパージョンの使用で、モルタルのブリーディングが著しく抑制され、ポリマー系減水剤にも、良好なブリーディング抑制効果がある。
- ②モルタルの1m程度の打込み高さでは、ポリマーを使用しても高流動モルタルに材料分離が生じるので、板状永久型枠製品の成形では、縦打ち法よりも平打ち法が良く、縦打ち成形法採用時には永久型枠の寸法に留意を要する。

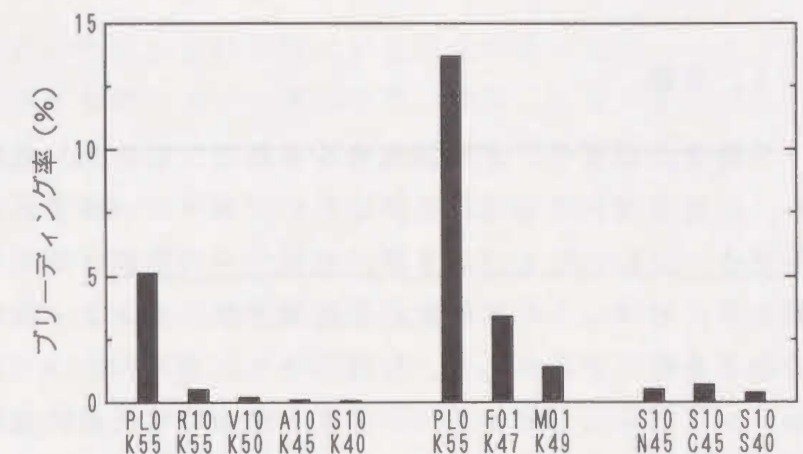


図-3.3 ブリーディング試験結果

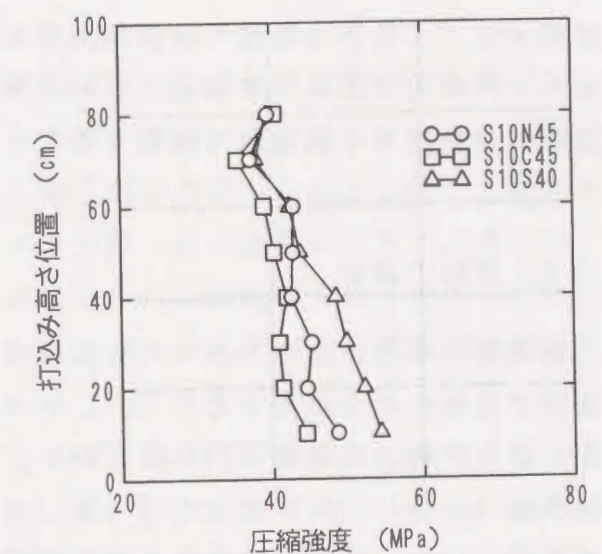


図-3.4 材料分離状況 (圧縮強度)

3. 5 モルタルの物性

(1) 序説

一般に、ポリマーを用いたモルタルは、ひびわれ抵抗性や付着性が向上するため、引張強度が改善される。しかし、ポリマー粒子は、弾性係数の低いプラスチックやゴムからなるばかりか、ポリマーの造膜作用のためには水を除去する必要があり、セメントの水和反応が阻害され、セメント硬化体で大切となる圧縮強度の低下を招く恐れがある。したがって、通常のPCMでは、初期材齢で湿潤養生し、セメントによってモルタルの骨格を強固にした後に乾燥養生に移し、ポリマーの凝集や造膜の作用でモルタルを改質させることになるが、やはり圧縮強度の改善効果は期待できない。

そこで、本研究では、一般的な成分からなる3種のセメント混和用ポリマーに加えて、2種のポリマー系減水剤および圧縮強度の改善効果が期待でき、しかも湿潤養生下でもある程度の改質効果があるとされるSA系ポリマーを使用した各種モルタルの力学的性状を調査するとともに、SA系ポリマーセメントモルタルの内部組織を走査電子顕微鏡で観察することにした。

(2) 実験の概要

各種材料を用いたモルタルや比較用の砕石と川砂を用いたAEコンクリートの諸強度や変形状を調査するため、 $\square 40 \times 40 \times 160\text{mm}$ 角柱供試体による曲げ強度および折片圧縮強度試験 (JIS R 5201)、 $\phi 50 \times 100\text{mm}$ 円柱供試体による静弾性係数試験 (JSCE-G502) などを行った。また、 $\square 40 \times 40 \times 160\text{mm}$ 角柱の折片供試体や $\phi 50 \times 100\text{mm}$ 円柱供試体による割裂引張強度試験、端部を粗面処理したアルミ板タブで補強した $10 \times 50 \times 400\text{mm}$ 平板供試体による直接引張強度試験なども行った。この直接引張試験方法については、次章で説明する。

モルタルの内部組織観察は、走査電子顕微鏡 (SEM) で行ったが、高倍率観測では水やガスなどが障害となるため、試料の強制乾燥を要するが、柔軟で温度依存性の高いポリマーを使用したモルタル試料の作製では、圧力や温度などに注意する必要があるが、これらの点も試行錯誤的な手法で対応した。

実験で使用したモルタル供試体は、振動などの締固めを行わずに練り混ぜたモルタルを流し込んで作製した後、材齢1日で脱型し、その後材齢7日まで 20°C 水中湿潤養生し、以後 20°C 乾燥 (60% R. H.) 養生を行った。また、各条件での供試体数は3個以上とし、実験結果には平均値を使用した。応力-ひずみ関係を調査するためにひずみゲージを接着した供試体については各条件2個とした。

(3) 実験の結果と考察

表-3. 4は、第1章で述べた日本道路公団による防食型枠工法のベースとなった東京大学生産技術研究所小林研究室での基礎研究に使用したモルタルの材料や配合を参考に、材料、配合、練り混ぜ方法などを簡略化して作製したモルタル製 $\phi 50 \times 100\text{mm}$ 円柱供試体から得られた材齢28日での載荷試験結果である。

この結果より、PAE系ポリマーのポリマー結合材比を0、0.1および0.2と増加させるに伴い、引張強度が増大するものの圧縮強度は激減することがわかる。また、静弾性係数が低下したり、ポアソン比が若干増加し、モルタルが徐々にプラスチックな性質を呈する傾向がみられる。

図-3. 5は、各種モルタルの曲げ強度試験結果である。また、3種の砂を用いたSA系ポリマーセメントモルタルの水結合材比と圧縮強度、曲げ強度および引張強度を、図-3. 6、図-3. 7および図-3. 8に各々示すとともに、モルタルの基本配合での諸強度を、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 円柱や $\square 100 \times 100 \times 400\text{mm}$ 角柱によるコンクリートの強度と比較して図-3. 9に示す。

図-3. 5より、SBR系、EVA系およびPAE系のポリマーを用いて湿潤養生を継続したモルタルの曲げ強度は、ポリマーを用いないプレーンモルタルに比べ、非常に小さく、乾燥養生を行った場合でも強度改善効果があまりないことがわかる。しかし、SA系ポリマーセメントモルタルでは、曲げ強度発現性が非常に高いといえる。なお、ポリマー混和剤の場合には若干の圧縮強度や曲げ強度の改善効果が確かめられるが、これは配合表にもみられるように混和剤の減水効果や材料分離低減効果の影響と思われる。

また、工場製品の生産性に大きな影響を及ぼす製品用型枠の回転率向上のためには、初期強度発現性が重要となるが、SBR系、EVA系およびPAE系のポリマーを用いたモルタルでは、材齢1日では脱型に要する強度に達しないという問題も確認できた。この材齢1日での強度発現性も、SA系ポリマーセメントモルタルはプレーンモルタルに比べて高いが、薄肉幅広板状製品の脱型、運搬などの作業性を考慮すれば、より高強度を初期材齢で発現できるよう、早強性のセメントや混和材料、熱や圧力による促進養生などの採用を検討する必要があるといえる。

図-3. 6～図-3. 9では、SA系ポリマーの使用がモルタルの圧縮強度、引張強度および曲げ強度の改善に非常に有効となることが、コンクリートとの比較あるいは強度の絶対値から判断できる。モルタルには早強セメントで、コンクリートには普通セメントを使ったというセメントの相違はあるが、セメントに対し10%程度のポリマー使用量で、同程度の水結合材比のコンクリートの2倍程度の諸強度を得ることが可能となっている。フェロニッケルスラグ砂の使用は、砕砂や湖砂に比べ、モルタルの圧縮強度、曲げ強度および引張強度の改善効果が高く

表-3. 4 モルタルの載荷試験結果

配合(略号)	PL0M01K45	A10M01K36	A20M01K30
圧縮強度 (MPa)	24.5	20.0	12.5
割裂引張強度 (MPa)	2.60	4.06	5.00
静弾性係数 (GPa)	18.0	15.8	15.2
ポアソン比	0.19	0.20	0.21

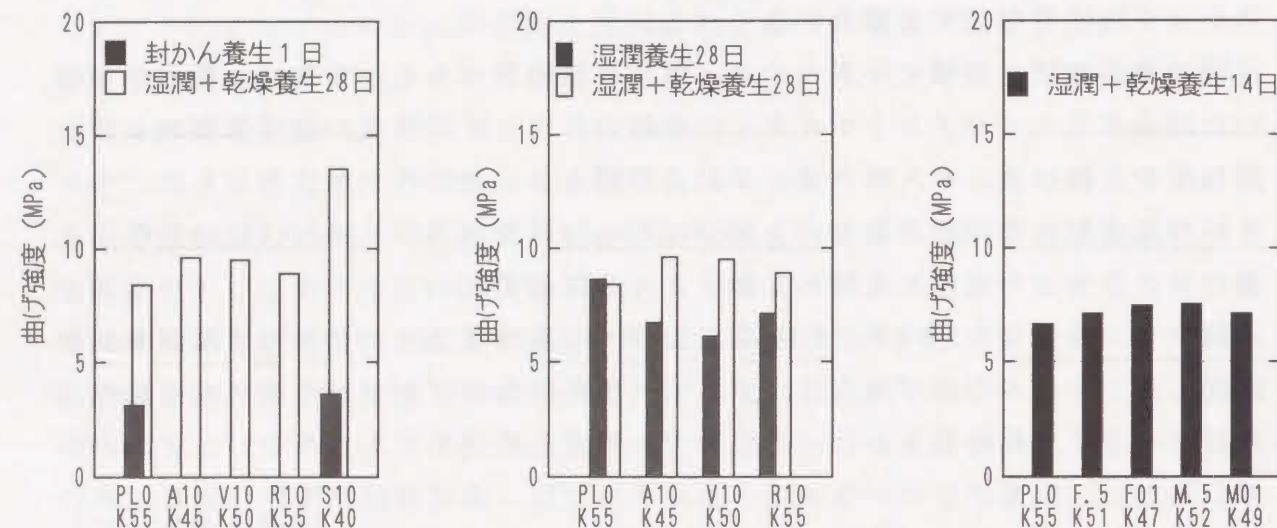


図-3. 5 各種モルタルの曲げ強度

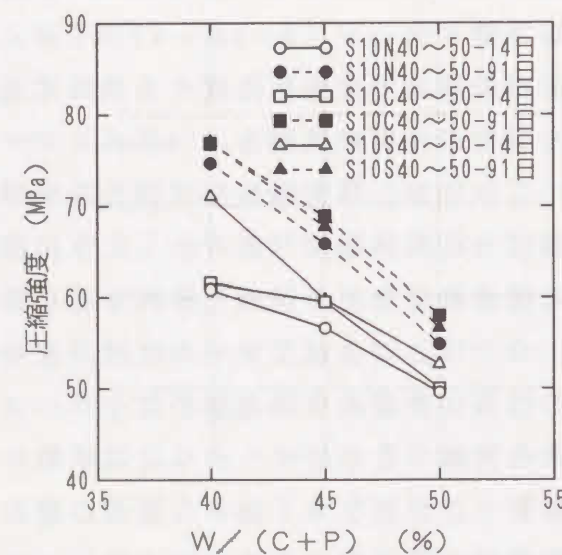


図-3. 6 SA系モルタルの圧縮強度

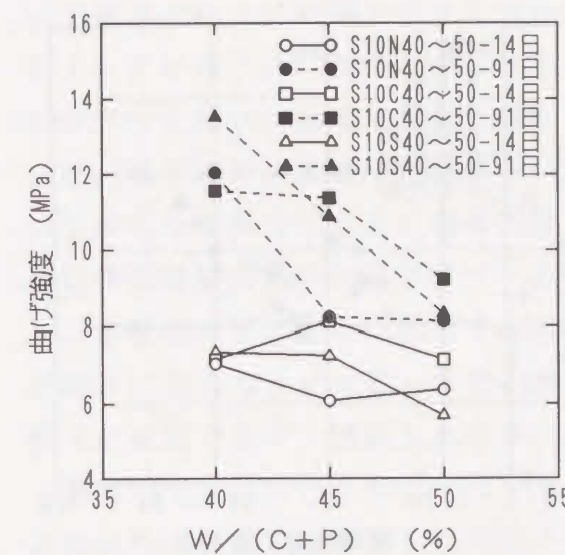


図-3. 7 SA系モルタルの曲げ強度

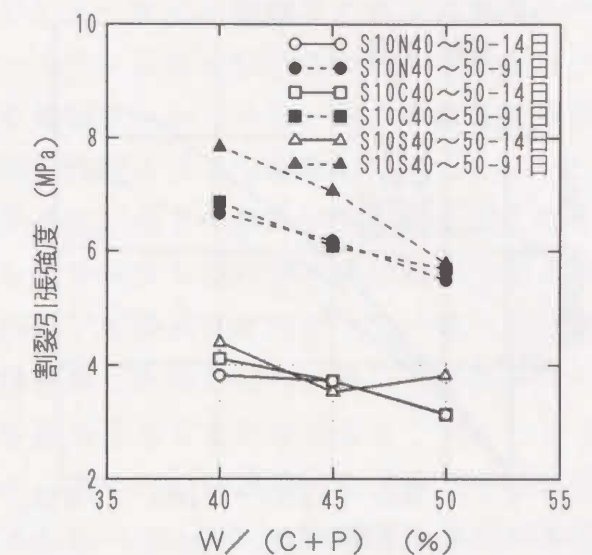


図-3. 8 SA系モルタルの引張強度

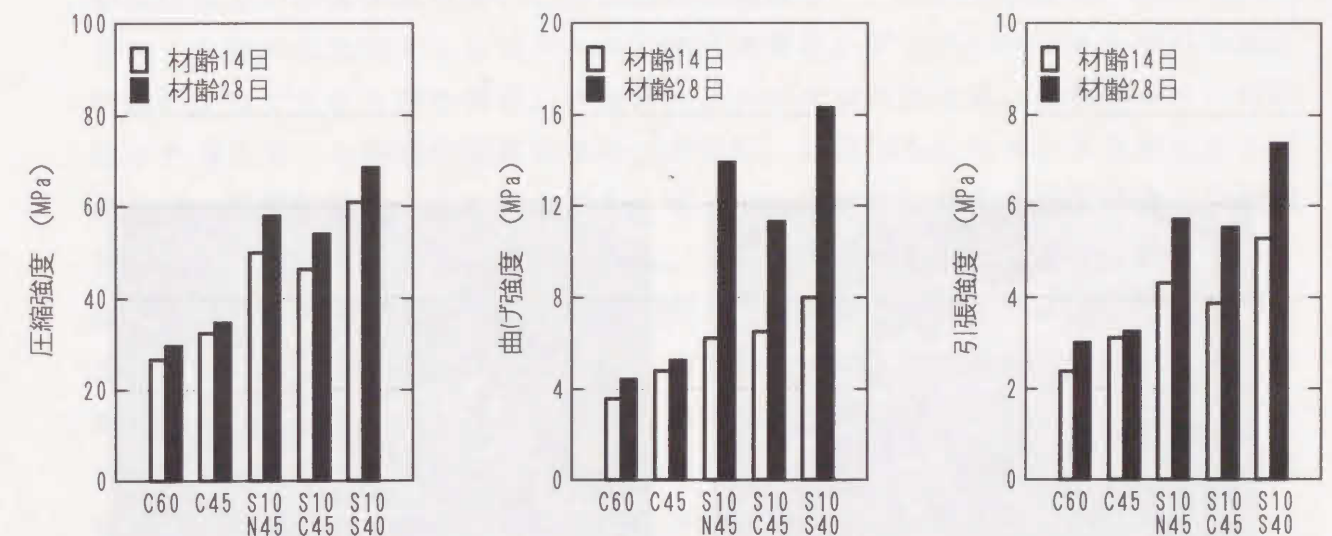


図-3. 9 SA系モルタルの諸強度

なっているが、これは水結合材比の低減効果、骨材粒子の強硬さや角張った形状などが影響したものといえる。

また、圧縮強度や湿潤養生時の強度発現にも効果のあるSA系ポリマーセメントモルタルの場合でも、通常のコンクリートと同様に、水結合材比の低減とともに諸強度が増大する傾向がみられる。しかし、材齢7日以降乾燥養生を継続すると強度が増進し、引張強度が材齢14日から91日にかけて2倍程度にまで増進するなど、乾燥養生による強度発現効果が高く、その効果が圧縮強度よりも曲げ強度や引張強度で顕著となることなど、普通コンクリートにない特性がみられる。

図-3. 10は、各種の砂を用いたポリマーセメントモルタルおよび比較用コンクリートの圧縮応力-ひずみ関係の一例であり、図-3. 11は、これらの関係が

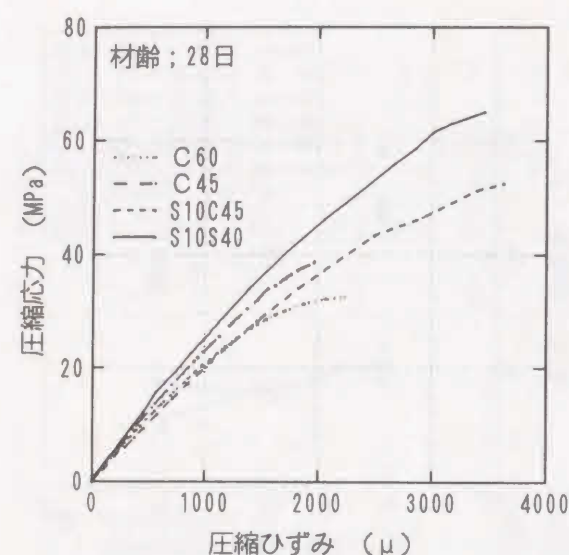


図-3.10 応力-ひずみ関係

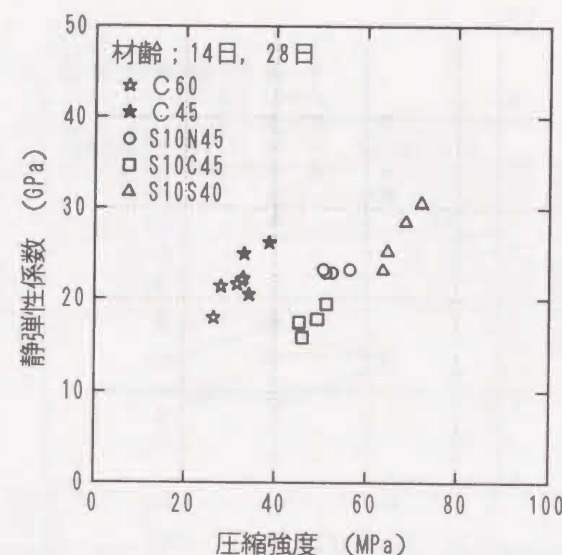
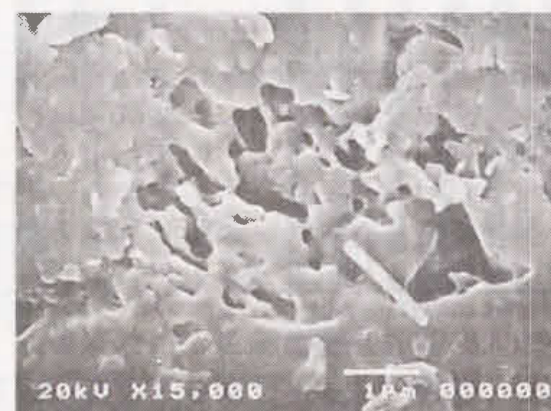


図-3.11 弾性係数と圧縮強度との関係



(1) 熱処理なし



(2) 熱処理あり

写真-3.3 走査電子顕微鏡によるSA系モルタルの内部構造

ら求めた1/3割線弾性係数と圧縮強度との関係を示したものである。

これらより、SA系ポリマーセメントモルタルは、コンクリートと比べて、圧縮強度を同程度とした場合の弾性係数はかなり低く、圧縮強度や最大圧縮応力時のひずみが大きいため、圧縮靱性が非常に高く粘り強い性質があるといえる。

写真-3.3は、SA系ポリマーセメントモルタル内部の走査電子顕微鏡写真である。走査電子顕微鏡観察では⁷⁷⁾、試料作製時に熱や圧力などによる強制乾燥を施すと、ポリマー使用モルタルの性状が変化するため、試料を乾燥材などを用

いて常温で徐々に乾燥させるとともに、ポリマー粒子が微細なため、導電用コーティング処理には、通常の金よりも金属コーティングの粒状性が優れた白金-パラジウムを用いて放電圧も抑えるなどの対処を行った。また、電子顕微鏡使用時には、電子線の加速電圧、プローブ径、照射時間などにも留意した。

このような処方により、急速凍結（クライオ）などの特殊処理を施さなくても、最低造膜温度の高いSA系ポリマーを使用したモルタルの内部組織が観察可能となり、造膜化せずに細孔に残留する直径1μm以下の微細な球形ポリマー粒子の存在が確認できることになる。また、加熱処理を施した場合には、独立したポリマー粒子が確認できず、連続したポリマー膜を形成することがわかる。

通常のコンクリートやポリマーセメント、あるいは同様な粒径のシリカフュームを高性能減水剤と併用したコンクリートと比べても⁷⁸⁾、乾燥養生強度が非常に高いこと、湿潤養生強度が比較的良好であること、圧縮強度に比べて曲げ強度や引張強度の増進効果が高いことなどから判断して、最低造膜温度の高いSA系ポリマーを混和したセメントモルタルの強度発現は、ディスパージョン中の界面活性剤によるセメント分散効果、消泡剤による空気量低減効果、球形ポリマー超微粒子の細孔充てん効果や凝集効果などの他に、常温でも、セメント水和による結晶化圧、乾燥収縮力などによっても、ポリマー粒子同士がある程度結合して造膜化することの効果などもあるといえる。また、SA系ポリマー粒子は、他のものに比べて最低造膜温度が高いことから判断して、強硬であるといえる。これらのことは、顕微鏡写真でもわかるように、通常のセメントモルタルでは存在しない球形超微粒子が空隙にのみ存在して密な組織中には確認できないこと、比重がセメントに対して1/3程度で平均粒径も1/100ほどのポリマー粒子を質量で10%程度使用しているにもかかわらず写真中の球形超微粒子が少ないこと、SA系ポリマーディスパージョンのみを自然乾燥させると、他のものよりも全体的には強硬だが、脆い部分と強固に結合している部分とが混在することなどからも推察できる。

(4) まとめ

モルタルの物性に関する本検討結果を以下に要約する。

- ①PAE系などの標準的なポリマー結合材比を増加させると、モルタルの引張強度は増大するが圧縮強度が低下し、静弾性係数の低下やポアソン比の増加など、プラスチックな性質を呈する。
- ②SBR系、EVA系およびPAE系ポリマーセメントモルタルは、プレーンモルタルと比べて湿潤養生曲げ強度がかなり低く、乾燥養生による強度改善効果もあまりないが、ポリマー混和剤の場合には若干の曲げ強度改善効果がある。
- ③SA系ポリマーセメントモルタルの圧縮強度、引張強度および曲げ強度は、材齢

7日以降乾燥養生することでコンクリートと比べて非常に高くなり、湿潤養生での強度発現性も良好である。

④SA系ポリマーセメントモルタルの初期強度発現性は比較的良好だが、SBR系、EVA系およびPAE系では非常に悪いため、工場で製品化される永久型枠に使う場合には、早強性のセメントや混和材料、熱や圧力による促進養生などの採用を検討する必要がある。

⑤砕砂や湖砂に比べてフェロニッケルスラグ砂の使用は、モルタルの圧縮強度、引張強度および曲げ強度の改善に有効だが、これは水結合材比の低減効果、骨材粒子の強硬さや形状などによるといえる。

⑥SA系ポリマーセメントモルタルは、コンクリートと比べて圧縮強度や最大圧縮応力時のひずみが大きいために圧縮靱性が非常に高く、圧縮強度を同程度と想定した場合の弾性係数はかなり小さい。

⑦ポリマーセメントモルタルの走査電子顕微鏡観察では、試料に熱や圧力などを加えると性状が変化するため、試料の乾燥やコーティング、観察時の電子ビームなどの条件に配慮が必要で、急速凍結などの特殊処理を必要とせず、モルタル中の粒径が1 μ mにも満たないポリマー粒子を観測することが可能となる。

⑧諸強度発現性や走査電子顕微鏡観察などより、最低造膜温度が高くて熱に対して比較的安定で強固なSA系ポリマーを含んだディスパージョンを使用したモルタルでは、細孔を充てんするポリマー粒子や熱や圧力で結合するポリマー粒子が混在し、ディスパージョンの界面活性剤や消泡剤の効果と合わせて優れた強度発現性に関与するものと推察できる。

3. 6 モルタルの耐久性

(1) 序説

コンクリート構造物の耐久性を高めるには、使用材料、配合、施工などの管理を十分行うことが重要となるが、塩害、中性化、アルカリ骨材反応などといった化学的劣化問題では、イオン、ガス、水分などの腐食因子の侵入を構造物の表層で抑止することも大切となる。コンクリートの化学的耐久性を改善するには、連続空隙の存在するコンクリートの遮へい性を高めるため、超微粒子ポリマーを界面活性剤で分散させたディスパージョンを使用し、界面活性剤の作用で水結合材比を低下させるとともに、ポリマー粒子の充てん、凝集および造膜効果で、内部組織を密化・連続化することが有効と判断できる。また、従来からの凍結融解

抵抗性やすりへり抵抗性などといった物理的耐久性に対しても、ポリマー混和材料の使用で、コンクリートの内部組織を密化するとともに、セメント水和物や骨材の接着性が高まり、優れた改善効果が期待できる。

しかし、薄肉でメッシュを積層する永久型枠は、コンクリートと比較して骨材量が少なくセメント量の多いモルタル製となるため、様々な条件下での耐久性に関する調査を行う必要がある。

(2) 実験の概要

本章で採用したモルタルの耐久性試験は、摩耗試験、塩分浸透試験、炭酸化試験および耐薬品試験である。なお、数ある耐久性試験の中で、ポリマーの使用によって多量に連行される空気を消泡剤で抑えたことによる影響が懸念される凍結融解試験に関しては第5章、ガラス繊維メッシュで問題となる耐アルカリ性試験については第4章に掲載し、モルタルの内部組織の遮へい性を評価する透気試験は第4章および第5章で取り上げることとした。

実験で採用した摩耗試験は、ボール盤を改良した試験機（アブレーション試験機）に鋼製歯車状のドレッシングホイール（ $\phi 60$ mm）を装着し、 $\phi 150 \times 50$ mm円柱供試体上で加圧（85N）させた状態で回転させ、摩耗損失量を測定するもので、ASTM C 779（B法）を参考に開発された装置の一つである⁷⁹⁾。この試験中、供試体の摩耗面に水を時々噴霧して湿潤状態を保ち、乾燥養生モルタル供試体は試験前に12時間水中で吸水させた。この試験状況を写真-3.4に示す。

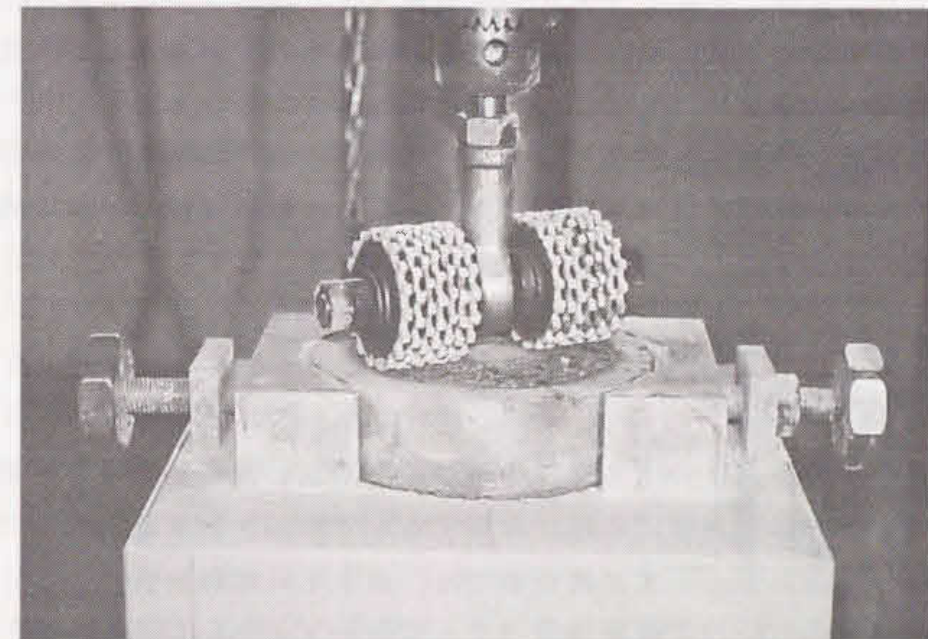


写真-3.4 摩耗試験状況

塩分浸透試験は、20℃恒温室内で飽和食塩水（溶解度約25%、4週ごとに浸漬液交換）に所定期間浸漬させたφ50×100mm円柱供試体を割裂し、その断面にデキストリン 1.5%水溶液、フルオレセインナトリウム 0.1%水溶液および硝酸銀 0.1%規定水溶液を順次乾燥させながら噴霧し、変色（蛍光）する塩素イオン浸透深さを調べるものである⁸⁰⁾。

炭酸化試験は、CO₂濃度を20%としたインキュベータ（温度；20℃、相対湿度；50%）で促進炭酸化させたφ50×100mm円柱供試体を割裂し、その断面にフェノールフタレイン溶液を噴霧し、赤色化しない中性化深さを調べるものである。この試験状況を写真-3.5に示す。

耐薬品試験は、JIS原案である「コンクリートの溶液浸漬による耐薬品性試験方法（案）」を参考に⁸¹⁾、20℃の恒温室内で硫酸マグネシウム10%水溶液および塩酸2%水溶液に□40×40×160mm角柱供試体を浸漬させ、質量変化を調べるものである。なお、浸漬液の交換は、試験開始12週までは2週ごとでそれ以降は4週ごととした。

これらの試験に使用した各条件での供試体数は、摩耗試験の2個を除いた他は3個以上であり、試験結果は平均値とした。また、試験材齢や浸漬期間などは実験結果の表中に示すことにする。

（3）実験の結果と考察

コンクリートの表面に対する摩耗作用は、構造物の種類で様々な形態が考えられる。道路などでは、表層に平行に作用するすりみがきに垂直方向のはく離、打撃などを伴うことが多く、水利構造物では、流水中の摩耗物質によるすりみがき作用や表面に生じる圧力の破壊作用（キャピテーション）も受けることがある。したがって、構造物が実際に受けるすりへり作用を適切に表現する試験を実験室

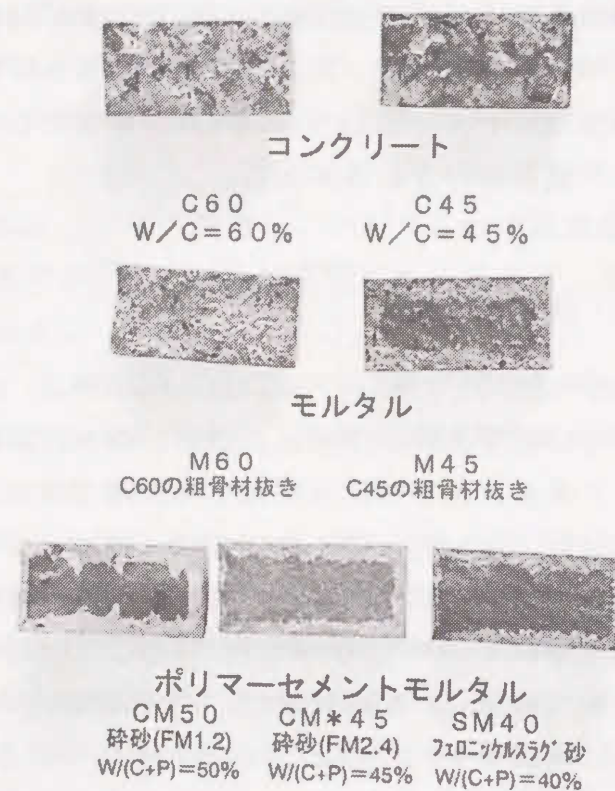


写真-3.5 炭酸化試験状況

で行うことは容易ではない。したがって、厚みのない建築材料には、JIS A 1451～1453に「建築材料及び建築構成部分の摩耗試験方法」があるが、土木・建築用コンクリートに関するJIS規定はない。

このようなコンクリート面の摩耗試験としては、再現性を目的としたシュミレーション法よりも基礎的なトライボシステム法が有効といわれている。ASTMでは、天然シリカ砂を空気圧で噴射するASTM C 418、ドリルプレス型の研磨試験機で、研磨材とディスク板、チェーン状治具を装着したドレッシングホイールおよびボールベアリングを各々供試体上で加圧しながら回転させるASTM C 779のA法、B法およびC法、小型ドレッシングホイールによる舗装版用のASTM C 944の方法、および鋼球を供試体上で振動させるASTM C 1138の方法などがある^{82), 83)}。JCIが1987年に制定したポリマーセメントモルタル試験方法規準（案）にも、研磨紙を使用する建築用のJIS A 1453を参考とした「ポリマーセメントモルタルの摩耗試験方法（案）」がある。

ASTM C 779（B法）を参考とした改良型試験機で得られたモルタルおよびコンクリートの摩耗試験結果を図-3.12に示す。これより、摩耗損失量は、天然けい石を原料とする碎砂使用モルタルでは、碎石や川砂など天然の岩石を原料として水結合材比が同じコンクリートと同程度となり、水結合材比の低減効果があり、粒子自体も強硬で角張りのあるフェロニッケルslag砂使用モルタルでは非常に小さくなっている。SA系ポリマーセメントモルタルは、コンクリートと比較すると単位骨材量が少なく、すりへりに抵抗する粒子径の大きな骨材も含有しないが、良好な耐摩耗性を有するのは、超微粒子ポリマーやポリマー形成膜が接着性、充てん性、平滑性などを改善することによるものと思われる。また、摩耗作用の激しい構造物には、フェロニッケルslag砂の使用が有効といえる。

図-3.13は、飽和食塩水に浸漬したモルタルやコンクリートの塩分浸透試験で得られた塩分浸透深さを示したものである。これより、SA系ポリマーセメントモルタルは、コンクリートと比べて水結合材比が同程度の場合でも塩分が浸透しにくく、高い遮塩性があるといえる。

また、促進炭酸化試験で得られたモルタルやコンクリートの炭酸化深さを示した図-3.14より、SA系ポリマーセメントモルタルは、コンクリートと比べて水結合材比が同程度でも炭酸ガスが侵入しにくく、高い炭酸化抵抗性があるといえ

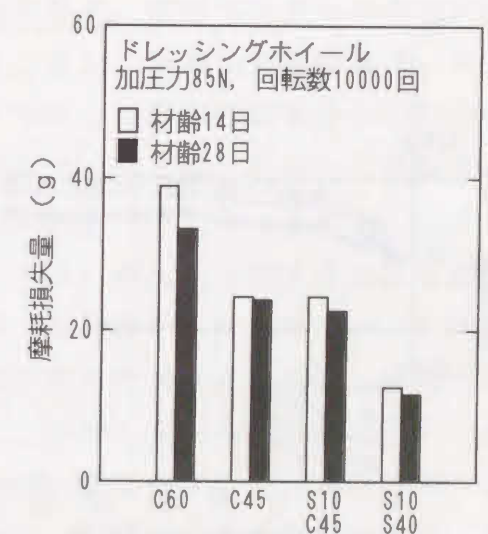


図-3.12 摩耗試験結果

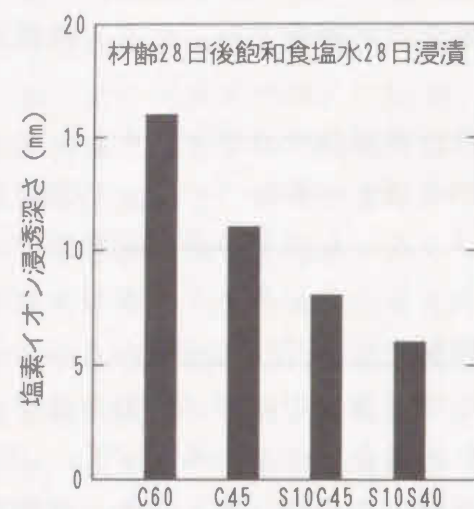


図-3.13 塩分浸透試験結果

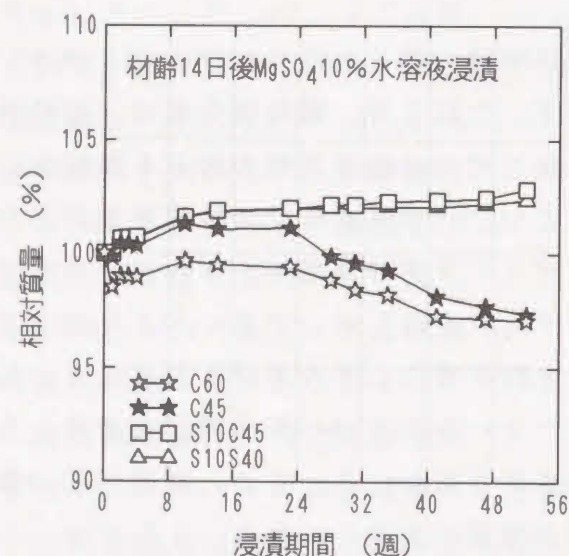


図-3.15 耐薬品(MgSO₄)試験結果

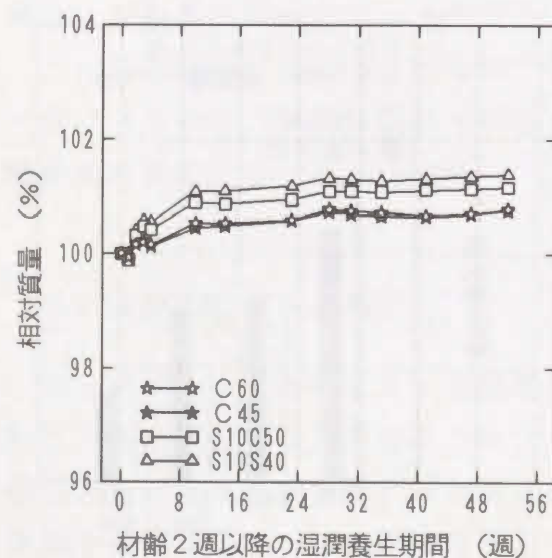


図-3.17 水中養生での質量変化

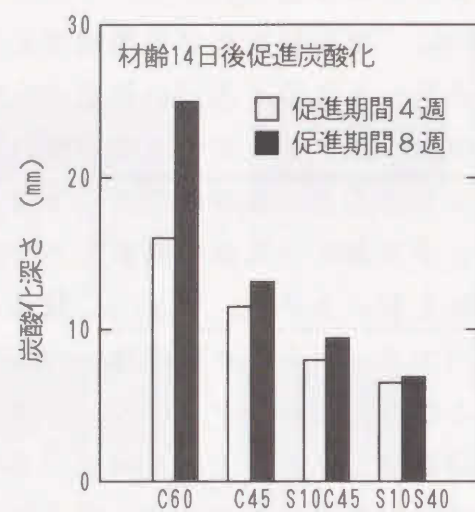


図-3.14 炭酸化試験結果

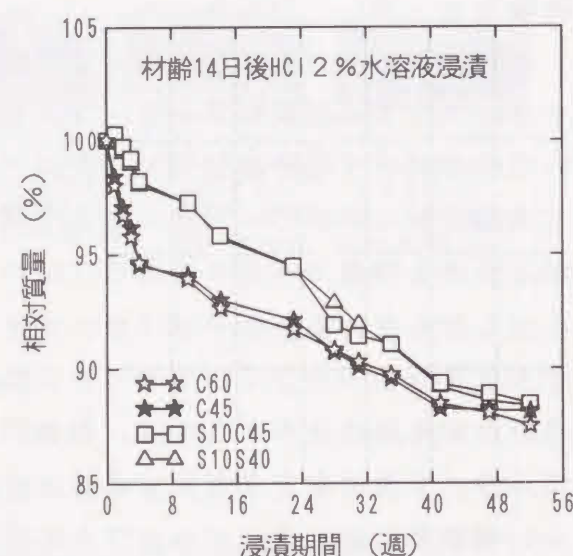


図-3.16 耐薬品(HCl)試験結果

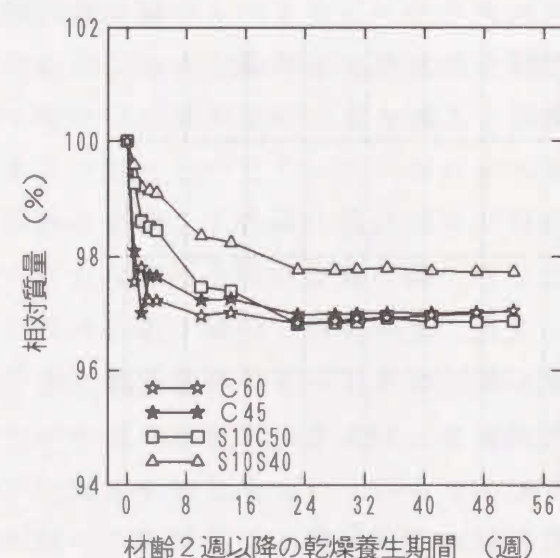


図-3.18 乾燥養生での質量変化

る。これらは、超微粒子ポリマーによる充てん、凝集、造膜などによる密化や遮へい効果などに起因するといえる。また、水結合材比を低減できるフェロニッケルスラグ砂の使用で、これらの効果がさらに大きくなることもわかる。

硫酸マグネシウム水溶液および塩酸水溶液に浸漬したモルタルやコンクリートの質量変化を各々図-3.15および図-3.16に示す。また、図-3.17および図-3.18は、これらの耐薬品試験と同時に測定した乾燥養生継続の場合と水中湿潤養生に移行した場合の質量の経時変化である。さらに、図-3.19は、28日間の薬品浸漬後の曲げ強度を示している。これらの薬品に対する試験で使用したモルタルは、材齢7日まで20℃湿潤養生した後、材齢14日まで乾燥養生して試験に供し、コンクリートは、試験開始材齢14日まで20℃湿潤養生を継続したものである。

硫酸塩水溶液が硬化後のコンクリートに侵入すると、セメント水和生成物の水酸化カルシウムと反応して硫酸カルシウムとなり、さらにコンクリート中のモノサルフェート相と反応して多量の水を取り込んだエトリンガイト(セメントパチルス)の大きな結晶を形成し、この反応が少ない場合はコンクリートの内部組織を充てんする利点にもなるが、反応が進展すると膨張崩壊を起こすことになる。とくに、硫酸マグネシウムでは、硫酸カルシウムと同時に生成する水酸化マグネシウムの溶解度が低いために溶液中のpH値が低くなり、水和したカルシウムシリケートをも分解するので侵食作用が激しくなる。また、塩酸による侵食は、セメントの水和反応で生成する水酸化カルシウムと反応して可溶性物質をつくり、それが溶出する場合と、この可溶性物質がモノサルフェート相と反応して多量の水を取り込んだエトリンガイトを形成する場合とがある^{8,4)}。

これらの結果より、湿潤養生したコンクリートは、海水や土壤に含まれる硫酸塩の作用で質量が一旦増加した後減少するが、乾燥養生したSA系ポリマー使用モルタルでは、吸水作用や硫酸塩の作用で質量が若干増加するものの、硫酸塩に対しては良好な抵抗性があるといえる。しかし、早強セメントとSA系ポリマーを併用したモルタルは、劣化速度が若干遅いものの、普通セメントを使用したコンクリートと同様に塩酸に対する抵抗性が低いため、耐酸性を要する場合には、セメントの種類、単位セメント量、ポリマーセメント比、配合、養生方法などへの

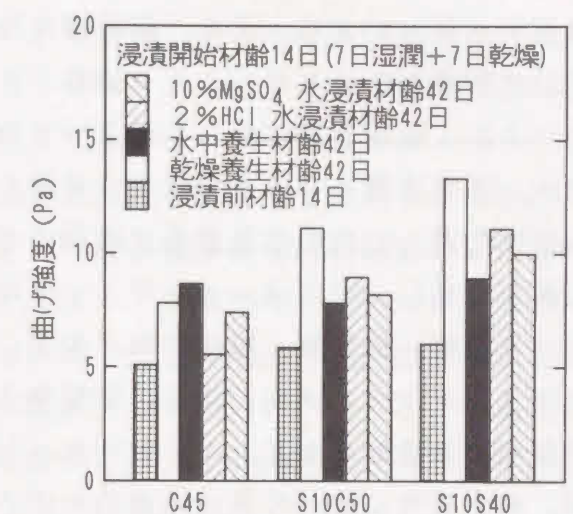


図-3.19 薬品浸漬後の曲げ強度

留意が必要といえる。また、耐硫酸塩性や耐酸性については、水結合材比や使用骨材の影響があまりないことも確認できる。なお、同じ供試体寸法であるコンクリートは、乾燥状態に移した後2～4週間程度で質量変化が収まるが、モルタルでは、定常状態になるまで数カ月を要し、これからもポリマーによるモルタルのち密性や遮へい性の改善効果が推察できる。

曲げ強度については、コンクリートの場合、水中養生を行ったものが最も高く、ついで乾燥、硫酸塩、塩酸の順となり、上述したことがうかがえる。また、ポリマーセメントモルタルの場合、乾燥養生を行ったものが最も高く、ついで塩酸、硫酸塩、水の順となる。ポリマーセメントでの乾燥養生の大切さはすでに述べたが、水中養生に比べて薬品浸漬のものの方が若干強度発現が良いのは、短期間の浸漬で生じた反応生成物が内部に残存し、組織をち密にしたりケミカルプレストレスが導入されたことなどが考えられる。

(4) まとめ

モルタルの耐久性に関する本検討結果を以下に要約する。

- ①SA系ポリマーセメントモルタルの耐摩耗性をコンクリートと比較すると、骨材量が少ないにもかかわらず、使用骨材の品質や水結合材比が同程度の砕砂使用の場合は同程度で、強硬で角張りがあり、水結合材比低減効果もあるフェロニッケルスラグ砂使用の場合は非常に大きい。
- ②SA系ポリマーセメントモルタルの塩分浸透性をコンクリートと比較すると、水結合材比が同程度の砕砂使用の場合でも高い遮塩性があり、フェロニッケルスラグ砂使用の場合は遮塩性がより改善される。
- ③SA系ポリマーセメントモルタルの促進炭酸化深さをコンクリートと比較すると、水結合材比が同程度の砕砂使用の場合でも高い炭酸化抵抗性があり、フェロニッケルスラグ砂使用の場合はこの抵抗性がより高くなる。
- ④SA系ポリマーセメントモルタルの耐薬品性をコンクリートと比較すると、耐酸性はほぼ同程度といえるが、耐硫酸塩性は非常に良く、耐薬品性に関しては骨材や水結合材比の違いによる差異があまりない。
- ⑤SA系ポリマーセメントモルタルでは、水分移動がしにくく、遮塩性、炭酸化抵抗性、耐摩耗性、耐硫酸塩性などが向上するのは、超微粒子ポリマーによる充てん、凝集および増膜などの効果によると考えられる。

3. 7 永久埋設型枠の美観対策

写真-3. 6は、表-3. 3中のS10C45とほぼ同じ配合でセメントに白色ポルトランドセメントを用い、着色率が悪いといわれる青系着色材を結合材に対して5～10%の使用し⁸⁾⁹⁾、表面部分に凹状のパターンを設けたモルタル板を型枠の一部とし、そこにコンクリートを打込んで作製した複合体である。型枠板作製にあたって、次章での検討項目であるガラス繊維メッシュのG(表-4. 1参照)を2枚積層し、コンクリートとの接合する裏面には10～20mm粒径の砕石を埋め込んでいる。

これより、埋設型枠の表面は非常に滑らかで、カラー化やパターン化にも適応性があり、構造物の美観向上に埋設型枠が有効であるといえる。これは、ポリマー粒子が白色ないし半透明で、砕砂も白色に近いこと、モルタルが高流動で分離しにくく、粗粒分や空気泡も少なくて充てんしやすいことなどが関係するものといえる。なお、フェロニッケルスラグ砂は黒色のため、モルタルを暗色系とする場合には有効といえるが、淡色系が要求される場合には不利といえる。

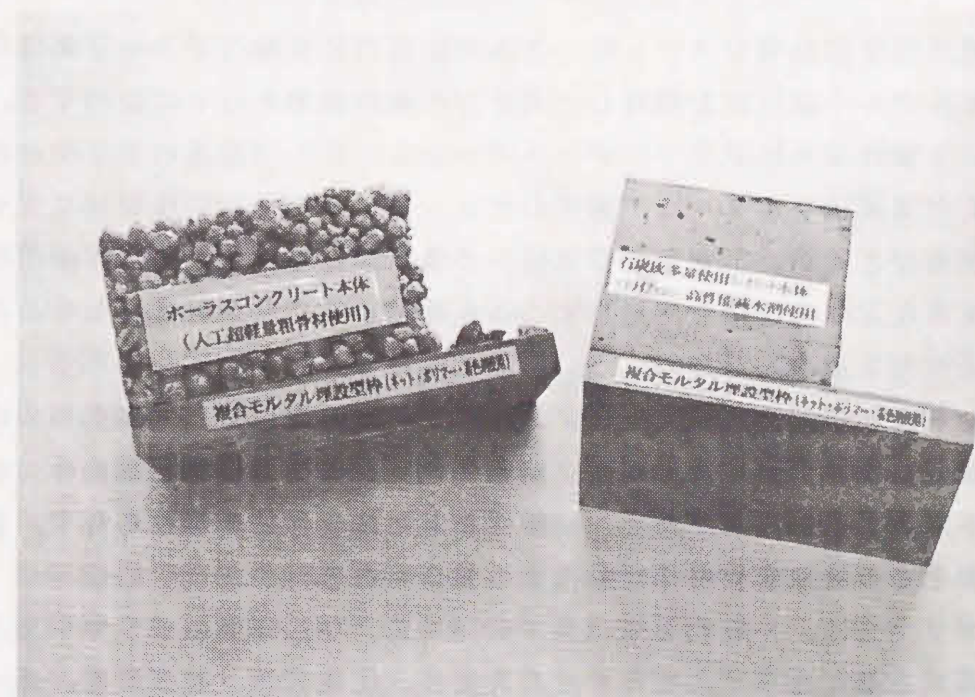


写真-3. 6 永久埋設型枠利用法の一例

なお、モルタル製型枠に一体化させたコンクリート本体には、比重1以下の超軽量人工粗骨材を使用して砂を用いないポーラスコンクリートと、フライアッシュの単位量を単位セメント量とほぼ同程度にまで高めてセメントや砂を節減したコンクリートを使用している。この前者は、超軽量化、天然砂保全、補強材の防食性に問題のある補強材の代用などを目的とし、後者は石炭灰の有効利用、天然砂の保全、セメントの節減などを目的とするものである。また、フライアッシュの多量使用に関しては、埋設型枠板による構造物保護で、炭素吸着という問題のあるAE剤をコンクリートに使用しなくても良いこと、型枠内で長期間密閉されるため、セメントの水和に比べて非常に緩慢なポズラン反応に要する水やアルカリを長期間保て、初期強度発現性が悪い場合も型枠内で養生を継続できることなどの利点がある。

また、研究・開発が進行中のハイパフォーマンコンクリートを含めた高流動コンクリートと永久埋設型枠との複合化工法は、非常に合理的な施工技術と考える。このように、永久埋設型枠は、現場打ちされる本体コンクリートへの新技術にも高い適応性があることがわかる。

3. 8 総括

永久埋設型枠製品用セメントモルタルの改質用に各種のポリマー系混和材料を用い、モルタルの諸性状を調査した本章での検討結果を以下に要約する。

①セメント混和用水性ポリマーディスパージョンを0.1程度のポリマー結合材比で使用した高流動モルタルは、通常のセメントモルタルと同様な練りまぜ方法で容易に製造できるが、不安定な空気泡が多量に連行されるため、界面活性剤系、シリコン系などの消泡剤を使用してこれを抑制することが大切となり、消泡効果は界面活性剤系消泡剤が高い。

②セメント混和用水性ポリマーディスパージョンの使用で、モルタルの流動性、材料分離抵抗性、引張強度、靱性、耐摩耗性、遮塩性、炭酸化抵抗性、耐硫酸塩性などが向上するが、曲げ強度、耐酸性などには改善効果がみられず、初期材齢や湿潤養生での諸強度発現性は悪化する場合もある。

③SA系ポリマーは、一般的なSBR系、EVA系およびPAE系のポリマーあるいはポリマー系減水剤に比べて、モルタルの流動性、圧縮強度、引張強度、曲げ強度などの改善効果が高く、強度発現には乾燥養生が効果的だが、初期材齢や湿潤養生での諸強度発現性、圧縮強度の増進効果なども比較的良好で、永久埋設型枠製品用モルタルへの利用に適する。

④産業副産物のフェロニッケルスラグ砂は、鋭角な角張りをもつがその表面は滑らかで、複雑な凹凸などの表面形状や細かな粒子に角張りのある天然砂あるいは角張りのある砕砂に比べ、比重が大きく、高流動ポリマーセメントモルタルに使用すると、材料分離を生じやすいので、工場で一般的な縦打ち成形法よりも平打ち成形法が適するが、流動性、圧縮強度、引張強度、曲げ強度、耐摩耗性、遮塩性、炭酸化抵抗性などを改善する効果は大きい。

⑤凹凸を有する砂の表面形状やポリマー超微粒子を使用したセメントモルタルの観察には走査電子顕微鏡が有効だが、最低造膜温度が比較的高いSA系ポリマーを使用したモルタル試料では、熱や圧力などによって性状が変化するため、乾燥、コーティング、電子ビームなどに試料を損傷させない対処が必要となる。

⑥ポリマーセメントモルタルでは、走査電子顕微鏡観察用試料に熱や圧力などを加えると性状が変化するため、試料に損傷を与えない乾燥、コーティング、電子ビームなどの対処が必要で、最低造膜温度が比較的高くて安定なSA系ポリマーを使用したセメントモルタルの内部観察などから、細孔を充てんするポリマー粒子や熱や圧力で結合するポリマー粒子が混在し、ディスパージョン中の界面活性剤などの効果とともに優れたモルタルの強度発現性に関与するものと推察できる。

⑦ポリマーセメントモルタルでは、砕砂（けい砂）、白色ポルトランドセメント、着色材の使用などで着色が容易にでき、流動性、充てん性、分離抵抗性などに優れ、はだ面が滑らかで凹凸などの模様化にも適するので景観材として利用でき、現場打ちコンクリートにおける様々な技術にも対応できる。

第4章 モルタル補強用連続繊維メッシュの検討

4.1 概説

永久埋設型枠をモルタルで作製する場合、モルタルの諸強度、靱性、ひびわれ抵抗性、耐久性、美観などを高めることのできるポリマー混和材料の利用が有効であることが、前章の検討結果より得られた。しかし、厚さ10~30mm程度の薄肉断面で、合板型枠のような幅広板となる永久埋設型枠では、製造から施工までの成形、養生、保管、運搬、組立、現場打ちコンクリートの打込みや締固めなどといった各種作業中、あるいは構造物表層に位置する供用中に衝突などの偶発荷重や過大な活荷重などを受け、破壊を生じる可能性が高い。

また、鉄筋コンクリート構造物の設計ではひびわれを容認しているが、耐久性や美観の改善を大きな目的とする場合には、ひびわれ幅の抑制が重要となる。さらに、モルタルでは、コンクリートと比べて単位水量が多くなるため、湿度や温度による体積変化が大きくなる恐れがあり、型枠製品の寸法精度に悪影響を及ぼすばかりか、供用中に現場打ちコンクリートとの一体性が損なわれ、モルタル埋設板が部分的に剥落する危険性、つまり第三者影響度も高まる可能性がある。

そこで本研究では、永久型枠への適用を想定したポリマーセメントモルタル板に連続繊維を補強材として使用し、ひびわれ抵抗性や寸法安定性などを改善することとした。この補強材を有効に使用すれば、荷重に対する補強筋としては無理でも、温度変化、収縮などに対して間隔や径の小さいものが要求され、組立にも手間を要する用心鉄筋などを削減できる可能性があるなど、施工や設計でのメリットも考えられる。しかし、繊維補強材には、多種多様な使用形態や繊維素材があり、その選定には多くの検討が必要となる。

補強効果の高い高強度・高弾性型の繊維は、FRPなどとして、航空・宇宙関係などの各種産業、スポーツ・レジャーおよび家庭用品にいたるまで多方面で使用されてはいるが、経済性が重視されるコンクリートの材料としては高価であり、少しの使用量で大きな補強効果を得るため、短繊維ではなく連続繊維を対象とした。また、2次元的な薄肉板状モルタル製品に使用する連続繊維補強材の形態としては、繊維の束を巻き取ったローピング（ワインディング法や吹付け法などで複合化）、織物にしたクロス、短く切って積層したマットなどが、繊維の使用形態として考えられるが、モルタルの充てん性を考慮し、繊維束による2次格子状織物、つまりメッシュを採用した。その織り方は、縦糸と横糸とを交互に織り込

む一般的な平織りに加えて、直線状に配した横糸を2束に分けた縦糸で交互に挟み込みながら織り込んだからめ織りを採用した。このからめ織りは、繊維束が解けにくく、モルタルとの機械的な付着力も高まるものと期待できる。また、繊維束の結合や繊維の保護のために樹脂やポリマーディスパージョンによる結合処理も行った。

補強メッシュの素材としては、薄肉モルタル板という制約上かぶりによる防食効果が期待できず、さびや金属色による美観上の問題や耐火性にも難があり、しなやかさが不足するので薄肉型枠の製造時には張力を与えるなどの配慮を要する鋼材を対象から外した。また、防食性の高いステンレス鋼、チタン鋼、アルミ合金などの金属メッシュは、非常に高価で、セメントによるアルカリと反応するものもあり、鋼材と同様に型枠製品の成形法に問題もあり、これらも除外した。そして、入手しやすさ、防食性、強度、弾性係数、耐熱性などを考慮して、補強用メッシュにガラス繊維、ビニロン繊維および炭素繊維といった高強度・高弾性型で新素材系繊維を使用することとした。

また、同様な新素材系の繊維にアラミド繊維、ポリオレフィン系繊維（ポリエチレン、ポリプロピレンなど）などがあるが、価格、強度、弾性係数、伸び、熱伸縮性、耐熱性、付着性、耐候性などの点を考慮して対象外とした。

ここで、FRPに代表される複合材料とは、2種以上の基材を組み合わせることで単一の材料では得られない特性を生み出すものであり、ある配向構造をもった非均質材料といえる。複合材料は、その構造的特徴から①連続型繊維強化および積層複合材料と②分散型強化複合材料とに大別され、強化すべき母材であるマトリックスには、プラスチック、ゴム、金属、セラミックス、コンクリートなどがあり、①では補強用繊維束や箔が荷重負担材になり、②では多数の超微粒子が分散するマトリックスが荷重負担材となる。

補強用繊維は、寸法効果や結晶配向などによって比強度・比弾性率などを高めた直径が10 μ m程度の単繊維（フィラメント）を束ね、これらを結合させて荷重分散性や曲げ剛性を高めたり耐食性を改善させるために使用する樹脂などと複合化させた繊維強化プラスチック（FRP）として使用されることが多い。

FRPについては、コンクリート分野でも、優れた防食性や軽量性を活かしてプレストレストコンクリート（PC）用の補強材に棒状のものを用いたり、フレキシブル性に富むシート状のものを補修・補強材に利用する研究、あるいは長さ数十mmの短繊維としてコンクリートに混入・分散する繊維補強コンクリートの研究が盛んである。しかし、メッシュとしての研究例は、金網を使うフェロセメント、ポリプロピレンなどの合成繊維による石綿代替セメント製品などに多くみられるが、本実験で採用した高強度・高弾性型の新素材系連続繊維に関する研究例は非常に少なく、さらにポリマーセメントモルタルと併用する研究はほとんどない。

なお、連続繊維メッシュ補強ポリマーセメントモルタルは、メッシュ自体が繊維と結合材からなる連続型複合材料であり、ポリマーの超微粒子や膜の混入したポリマーセメントモルタルは分散型・連続型共有の複合材であり、モルタル自身もセメント硬化体と砂粒子という分散型複合材料で、複雑な複合材料といえる。

以上のようなことを踏まえて、3種の素材からなる連続繊維メッシュおよびメッシュ形状の異なる3種のガラス繊維メッシュなどを、第2章で取りあげた各種のポリマー系混和材料を使ったモルタルに利用し、諸強度や長さ変化などの物性、ガラス繊維で問題となる耐アルカリ性などに関する調査を本章で行うこととした。

4. 2 繊維補強セメント系複合材の補強機構と繊維材料

(1) 補強機構

繊維補強セメント系材料は、母材(matrix)であるセメント・コンクリートと分散相(dispersion)となる繊維とから構成された複合材料の1種である。したがって、その力学的性状は、繊維補強材およびマトリックス両者の破壊(終局)強度、破壊時伸び能力、弾性係数などに支配される。

繊維によるマトリックスの強化理論で最も簡単で基本的な複合則について以下で説明する^{86~88)}。

繊維とマトリックスとがひびわれ発生まで一体となって挙動すると仮定すると、変形の適合条件と力学的なつり合い条件から以下の式が誘導できる。

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f = \varepsilon_m = \sigma_c / E_c = \sigma_f / E_f = \sigma_m / E_m \quad (4.1)$$

$$P = \sigma_c A_c = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m \quad (4.2)$$

ここに、 ε : ひずみ, σ : 応力, E : 弾性係数, および A : 断面積であり、各々の添字は、 c : 繊維補強複合体, f : 繊維, および m : マトリックスを示す。これより、単位断面積($A_c = 1 = A_f + A_m$)に伝達される複合体の平均応力は次式となる。

$$\sigma_c = \sigma_f A_f + \sigma_m (1 - A_f) \quad (4.3)$$

さらに、荷重方向に対して単位長さ、すなわち単位体積を考えると、 $V_c = A_c \times 1 = 1$ で、 $V_f = A_f$, $V_m = A_m$ となり(ここで、 V_f および V_m は各々繊維およびマトリックスの体積比)、(4.3)式の平均応力は以下ようになる。

$$\varepsilon_f E_f V_f + \varepsilon_m E_m (1 - V_f) = \varepsilon_c E_c V_f + \varepsilon_c E_m (1 - V_f) \quad (4.4)$$

また、弾性係数についても同様に次式となる。

$$E_c = E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (4.5)$$

ここで、繊維の伸び能力がマトリックスよりも大きいとすると、マトリックスが終局ひずみ(u :終局状態を表す添字)に達したときのマトリックスや繊維の応力状態は次式となる。

$$\sigma_f = \varepsilon_{mu} E_f = \sigma_{mu} E_f / E_m \quad (4.6)$$

したがって、複合体がひびわれを生じる(cr :ひびわれ発生を表す添字)時の断面平均応力 σ_{cr} は、(4.4)式と(4.6)式とにより、次式となる。

$$\sigma_{cr} = \sigma_{mu} \{1 + V_f (E_f / E_m - 1)\} \quad (4.7)$$

また、マトリックスに生じたひびわれ箇所における応力伝達能がなくなり($\sigma_m = 0$), 外力には繊維および繊維とマトリックスとの付着によって抵抗するため、複合体の終局強度は下式となる。

$$\sigma_{cu} = \sigma_{fu} V_f, \quad E_{cu} = E_f V_f \quad (4.8)$$

以上より、複合体の強度や弾性係数は、繊維量および繊維の弾性係数を大きくすることで高まることがわかる。

つぎに、複合体のひびわれ発生強度や終局強度に及ぼす繊維量の影響について説明する。

(4.7)式は、 E_f / E_m が1より大きい小さいかによって右上がりか左上がりの直線になることを示している。マトリックスのひびわれ発生強度が繊維を混入しても変わらないと仮定すると、繊維の弾性係数が大きい場合、複合体のひびわれ発生強度は、繊維体積比および繊維とマトリックスとの弾性係数比が大きくなるとともに増加する(図-4.1参照)。

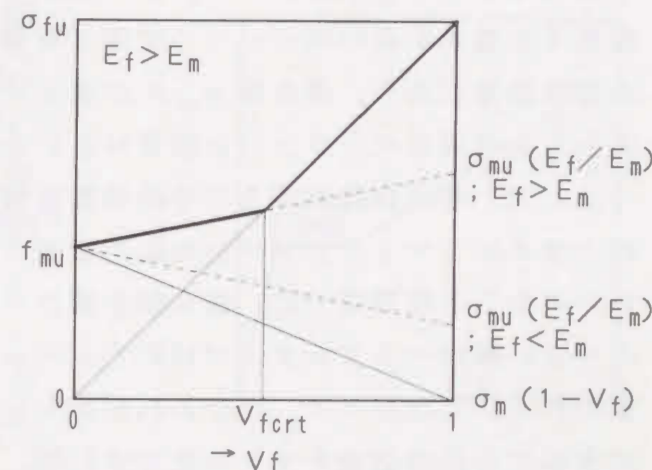


図-4.1 繊維体積比の影響

また、繊維体積比がある限界値を越えなければ複合体の終局強度がひびわれ発生強度を下回り、ひびわれ発生後の終局強度が増加しない。この限界体積比は、(4.7)式と(4.8)式との交点で求められる。一方、繊維量が十分あると、ひびわれ発生後も応力が増加して強度面でも複合効果が得られる。この終局状態に対する補強効果の限界繊維体積比($V_{f,cr}$)は次のよう求められる。

ひびわれ発生直前のマトリックスは終局ひずみ ($\epsilon_c = \epsilon_{mu}$) 状態のため、断面平均応力は (4. 4) 式より次式となる。

$$\sigma_c = \epsilon_{mu} E_f V_{fcr} + \sigma_{mu} (1 - V_{fcr}) \quad (4. 9)$$

ひびわれ発生後は繊維のみで荷重に抵抗するから、その強度は次式となる。

$$\sigma_c = \sigma_{fu} V_{fcr} \quad (4. 10)$$

限界繊維体積比は (4. 9) 式と (4. 10) 式との交点であり、下式が得られる。

$$V_{fcr} = f_{mu} / (\sigma_{fu} - \epsilon_{mu} E_f + \sigma_{mu}) = E_c \epsilon_{mu} / \sigma_{fu} \quad (4. 11)$$

繊維は一般的に高価であり、補強効果を得られる限界体積比は小さいことが望ましい。このためには、高い強度や弾性係数を有する繊維の使用、限界ひずみの大きいマトリックスの使用などが有効で、マトリックスの強度は低い方が良いといえる。なお、マトリックスよりも弾性係数の低い繊維では、強度の増進効果がないものの多量使用により、衝撃吸収エネルギーなどの改善効果が期待できる。

前章で取り上げたポリマーセメントモルタルでは、限界ひずみが増大するが、強度自体も高くなる。脆性材料であるコンクリートでは、ひびわれがイオン、ガス、水分の供給路となり、耐久性を悪化させる原因となるので、補強材を用いた複合体の終局強度と同様にひびわれ発生強度を重視する必要がある。またその後のひびわれ進展状況も大切で、ひびわれは生じにくくかつ生じた場合でもその幅を極力小さくする必要がある。この点から、引張力に対するモルタルの抵抗性を改善する効果が高いポリマーの使用は有効といえる。さらに、ポリマーには優れた接着効果があり、複合体としての基本である繊維とマトリックスとの付着性の面からも有用なマトリックス改質材といえる。

ここで、複合体における力学的特性の解明には、その構成要素である繊維補強材とセメントマトリックスとの応力伝達のモデル化が必要となる。複合体にひびわれが生じる前段階では、複合則が適用され、セメント硬化体のような引張強度の小さい脆性マトリックスでは応力レベルが小さいため、一般的に弾性体として扱われる。したがって、ひびわれが生じた複合体における繊維とマトリックスとの界面での応力伝達をモデル化できれば、その力学的挙動を予測することが可能となる。このようなアプローチは、1960年代から種々試みられているが、繊維強化セメント・コンクリートの適用性や多様性に関する技術研究に比べると、理論的研究は歴史が浅く、今後の進展が期待されるところである。

この応力伝達のモデル化としては、弾性付着応力伝達（構成要素界面の弾性的な連続性を仮定）、摩擦付着応力伝達（界面に作用する付着応力が摩擦応力のよう単位面積あたり一定で均一と仮定）および両者の組み合わせ（付着が切れていない部分は弾性的応力伝達をし、切れた部分は摩擦付着応力と仮定）という3

つの方法がある

これらの応力伝達のモデル化は、基本的な初期ひびわれ発生直後の応力状態を扱っている。限界繊維体積比以上の繊維で補強したマトリックスの引張挙動の予測は、初期ひびわれ発生直後の応力状態の変化、その後のひびわれ発生に伴う応力の再分配などを理解する必要がある。補強材が連続繊維と短繊維とでは破壊形態が異なるので、以下には Avestonらの研究で知られている連続繊維補強複合体のケースについて簡単に説明する。

弾性付着モデルでは、初期ひびわれ発生ひずみ (ϵ_{mu}) における応力 ($E_c \epsilon_{mu}$) までは弾性挙動を示し、ひびわれが入るとひびわれ面から指数関数的に応力伝達が起こり、応力-ひずみ曲線はスムーズな応力上昇カーブを描きながらひびわれの発生が続き、やがてその傾きは $E_f V_f$ に近づいて繊維のみで荷重を受けもち、繊維の破断とともに複合体が破断する（図-4. 2参照）。弾性モデルでは、繊維とマトリックスとの界面で付着切れが起こらないのであれば、ひびわれは複合体が破断するまで発生し続けてひびわれ間隔が無限に小さくなるが、実際は界面で付着応力が増加して付着切れを生じる。

摩擦付着モデルでは、初期ひびわれ発生までは弾性付着モデルと同様に、初期ひびわれ発生ひずみ (ϵ_{mu}) における応力 ($E_c \epsilon_{mu}$) まで、繊維とマトリックスが一体となって外力に抵抗するので右上がりの直線領域となる。しかし、初期ひびわれ発生以後ひびわれ発生終了点までは、応力がほぼ一定の状態、ひびわれが次々と発生する多発ひびわれ領域となり、その後再び応力上昇領域を迎えて繊維のみで外力に抵抗し、やがて繊維の破断とともに複合体も破断にいたる（図-4. 3参照）。

弾性付着と摩擦付着の組み合わせモデルでは、ひびわれ面近くの付着切れが起こっている部分では摩擦付着による応力伝達となり、界面の付着が維持されている部分では弾性付着による応力伝達となるが、付着状態の判断が問題となる。

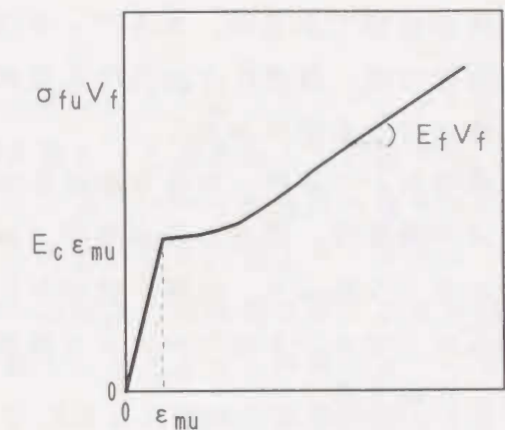


図-4. 2 弾性付着モデル

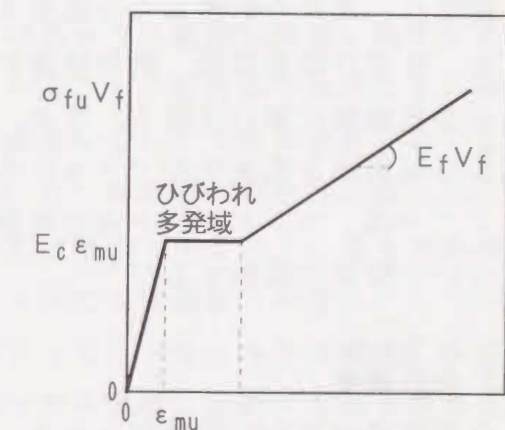


図-4. 3 摩擦付着モデル

ポリマーを使用したセメントモルタルでは、繊維との付着性が高まるので、弾性付着モデルに近い引張応力-ひずみ関係となることが予測されるが、高価でかつモルタル板の成形性から使用量が限られる繊維補強材の配置、繊維補強材として使用を考えているメッシュの形状、多くの材料からなるモルタルの特性などを考えると均等質な複合体をつくるのは不可能で、理論通りに応力伝達がスムーズに行われないことは容易に予想されるが、埋設型枠をコンクリート構造物の補強材として将来利用するためには、補強機構のモデル化は非常に重要となる。

モルタルマトリックスの補強材としては、高い強度や弾性係数を有する繊維の使用が有効であるが、マトリックスとの付着性も補強機構上重要であり、永久埋設型枠では、経済性や耐久性も要求されるため、繊維の材質や使用形態の検討を的確に行う必要がある。

複合体の一体性、つまり繊維とマトリックスとの付着性については、マトリックスの接着性、繊維の表面形状、両者の微視的界面構造、弾性係数およびポアソン比などの他にも、乾湿、熱などによる伸縮性、両者間で生じる可能性のある化学反応（セメントのアルカリと補強材との反応など）、複合体の成形性などが複雑に作用する。

（2）繊維材料

繊維は、素材や形態から分類できる。素材では、天然素材と人工素材とに大別され、前者は植物繊維、動物繊維および鉱物繊維、後者は有機繊維、無機繊維および金属繊維に細分される。また、形態では、長さによる短繊維と連続繊維、構成から単繊維と繊維束などと分けられる。

ここでは、コンクリート用の補強材として使用実績のある高強度型の連続繊維について簡単に説明する^{8)~9)}。

1) 金属繊維

金属繊維の代表は鋼繊維である。これ以外には、ステンレス繊維、アルミナ繊維、チタン合金繊維、アモルファス金属繊維などがあるが、セメント系マトリックスの連続繊維補強材としては非常に高価で使用実績がほとんどなく、今後の検討課題である。鋼繊維を短繊維として使用する鋼繊維補強コンクリートは、土木学会年次講演会などでの論文発表も多く、吹付けコンクリート、土間コンクリート、コンクリート舗装、製品などで実用化も進んでいる。連続繊維補強コンクリートとしては、第2章で述べたように各種の金網を用いたフェロセメントが有名で、ヨーロッパではRCよりも歴史が深く、わが国でも1970年代に日本セメントのフェロセメントセンターなどが中心となって研究開発が行われてきた。フェロセ

メントの適用例としては、船舶が有名で、タンク、プレハブ建築部材、エクステリア製品などの実績も多い。また、金網は吹付けコンクリート用補強材にも使用されている。

実用化の進んでいる鋼繊維補強コンクリートは、ひびわれが生じにくくてセメント量の多い富配合でもあることに加えて、導電性のある短繊維が独立してランダム配向するため、腐食電流（アノード・カソード反応）によるマクロセルの形成や維持ができなくなり、劣化が生じにくいといわれている。しかし、コンクリート表層における腐食は避けられず、美観上大きな問題となる。

2) ガラス繊維

ガラス繊維は、無機質原材料を加熱溶融し、紡糸ノズルからフィラメントを高速で吹き出し、急速冷却で固化させ、収束剤を塗布して引き揃えて製造する。その歴史は、ある遊牧民が砂の上で行ったたき火の火床にできた溶けたガラスの溜りを、木の棒でつついてガラスの糸を引いたとの言い伝えに始まり、古代エジプト時代やルネッサンス時代には職人たちがガラス製品の装飾用にガラス糸を使い、1893年のコロンビア博覧会ではガラス繊維と絹でできたガウンを身にまとった女優に人々が群がった。1900年代に入るとドイツでガラス繊維の開発が盛んになり、アメリカで1938年にガラス繊維の会社が設立されて近代工業の1つとなり、わが国では、東京オリンピックの棒高跳びで使われたポールが注目された。このように、今では建設資材、住宅機材、船体・車体、タンク、工業機材、スポーツ用品、光ファイバーを始め様々な方面で活用されているガラス繊維には長い歴史がある。

ガラス繊維の特徴は、汎用性に富み安価であること、弾性体であること、機械的強度が高く伸びが比較的小さいこと、温度依存性がなく寸法安定性が高いこと、溶解軟化（軟化点;800℃）は起きるが燃えないので耐熱性や断熱性に優れること、耐薬品性や耐候性が大きいこと、非磁性で電気絶縁体であること、透光性が高く着色も可能なことなどで、コストパフォーマンスに大変優れている。

このようなガラス繊維には、組成上、①無アルカリ（E）ガラス繊維、②含アルカリ（CまたはA）ガラス繊維、③高強度ガラス繊維、④耐アルカリガラス繊維などがあり、①は標準的でFRPや電気用品に使用され、②は耐酸性に優れ、③は強度や弾性係数が高く、④は高ジルコニア含有率によりアルカリ抵抗性が高いという特性がある。しかし、耐アルカリ性といえども、強アルカリ雰囲気中では劣化を起こすことが知られている。

3) 炭素繊維

炭素繊維は、1860年にイギリスのSwanが紙片を炭素化させて白熱電灯用フィラメントを試作したことに始まり、1879年に発明王のEdisonがわが国の竹を使って白熱電灯用フィラメントを実用化させている。その後、1950年代末にアメリカで

レーヨンを原料とした炭素繊維が製造され、1960年には現在の主流であるポリアクリロニトリル(PAN)系繊維が、また1963年にはピッチ系繊維がわが国で相次いで開発された。これらは、レーヨン繊維、PAN繊維および石油・石炭系副産物のピッチを不活性雰囲気中で加熱処理して得られるもので、熱処理温度によって、耐炭化繊維(200~300℃)、炭素質繊維(800~1500℃)および黒鉛質繊維(2000℃以上)に分類される。

炭素繊維の特徴は、原料や製法によって差が大きい、一般に比重が小さく強度や弾性係数が高いこと、熱伸縮性が非常に小さいこと(線膨張係数; -1×10^{-6} /℃程度)、耐熱性に優れていること、電気伝導性と電磁遮断性を有すること、耐薬品性が高いことなどがある。しかし、コンクリートの補強材としては、高価であること、伸び能力が小さいこと、せん断強度が低いこと、黒色であること、表面が不活性でFRP製造時には酸化など特殊な処理を要することなどの問題があり、軽量性やしなやかさがフレッシュコンクリート中での移動や変形を起こしたり、コンクリートとの熱膨張率の違いや付着性の悪さが母材との一体性に悪影響を及ぼすことがある。

4) アラミド繊維

アラミド繊維は芳香族ポリアミド繊維の一般名で、1971年にアメリカで開発された。濃硫酸や溶剤に溶解したポリアミドを液晶状態にして紡糸してつくられるアラミド繊維には、高強度・高弾性のパラ型と耐熱性・難燃性のメタ型がある。なお、ナイロンは脂肪族ポリアミド繊維で、耐熱性・難燃性には優れているが強度特性が劣り、複合材料用補強材としてはあまり使用されない。

アラミド繊維の特徴は、高強度で弾性係数も高いこと、軽量で比較的伸び能力があること、熱伸縮性が小さいこと、振動減衰性が高いこと、合成繊維としては耐熱性が高く自己消化すること、強酸以外は耐薬品性に優れること、非磁性で電気絶縁体でもあることなどがある。しかし、コンクリートの補強材としては、高価であること、黄色であること、引張強度に比べて圧縮強度が低いこと、合成繊維のためにポアソン比が大きく付着性が悪いこと、紫外線などに関する耐候性が劣ることなどが問題で、軽量性や熱膨張係数なども災いする懸念がある。

5) ポリビニルアルコール繊維

ポリビニルアルコール(PVA)を主体とする合成繊維を開発したわが国では、これをビニロン繊維と呼んでいる。PVAは1924年に合成され、1950年頃から工業化が始まった。水溶性のPVAを水に溶解して紡糸し、熱延伸により製造されるビニロン繊維は、高強度・高弾性の製品開発も進んでおり、ポリプロピレン繊維とともに石綿セメント製品の代替品などとして利用され始めている。

ビニロン繊維の特徴は、軽量で強度も高いこと、しなやかでフレキシブル性に

富むこと、伸び能力が大きく耐衝撃性に優れること、吸水性や表面起伏性がありセメントマトリックスとの付着が良いこと、合成繊維としては耐熱性に優れること、透光性があり着色も可能なこと、燃焼時に有毒ガスが生じないこと、耐薬品性とくに耐アルカリ性が高いことなどである。しかし、コンクリートの補強材としては、高弾性といえども他の繊維に比べて弾性係数が低いこと、ポアソン比や熱伸縮が大きいこと、引張強度に比べて圧縮強度が低いことなどが問題で、軽量性、吸水性などが成形時に災いすることもある。

6) ポリオレフィン系繊維

オレフィンとは、1個の炭素間2重結合を有する反応性の高い不飽和炭化水素のことで、この重合でポリオレフィン樹脂がつけられ、ポリエチレンやポリプロピレンなどがこれに属している。1933年にイギリスで偶然発見されて1940年代始めに商業化されたポリエチレンや、1950年代にイタリアで商業生産の始まったポリプロピレンは、安価な汎用性高分子材料として多方面で利用されている。これらの繊維化は、加熱により溶解して紡糸し、さらに延伸・冷却固化によって行われる。近年は、高密度・高強度のポリエチレン繊維、延伸したフィルムを結晶軸方向に裂け目を入れて横方向に広げた(フィブリル化した)網目状ポリプロピレンなどがセメント製品などに利用されている。

ポリオレフィン繊維の特徴は、安価なこと、延び能力が大きくて強度も比較的高いこと、比重が小さいこと、耐薬品性に優れること、疎水性であることなどがある。しかし、コンクリートの補強材としては、弾性係数が低いこと、耐熱性が劣り熱伸縮性が大きいこと、疎水性でありポアソン比も大きいために付着性が悪いこと、しなやかで比重が非常に小さいので成形時に浮き上がりなどを起こすことなどの問題がある。

本研究では、永久埋設型枠としての成形性、耐久性、美観などに着目し、ガラス繊維、炭素繊維およびビニロン繊維を取り上げて実験を行ったが、入手性、価格、比重、透光性、着色性、強度、弾性係数、伸度、付着性、熱伸縮性、防食性、耐塩性、耐候性、耐熱性、加工性などに優れたバランスの良さから、ガラス繊維を重点的に使用した。

ガラス繊維は、表面に水酸基を有しているため、カップリング剤を介して樹脂などとは接着しやすいが、セメントマトリックスのアルカリに対する抵抗性が問題となるので、コンクリートには樹脂などを結合材として含浸・熱処理したFRPや耐アルカリガラス繊維の使用、セメントマトリックスの低アルカリ化などが要求される⁹⁶⁾。しかし、ガラス繊維に限らず、各種のFRPでは、繊維自体あるいは結合用で感温性の高い樹脂がアルカリと反応することの報告や、セメント混和

用ポリマーなどにもアルカリ劣化が起きるとの指摘があり、これらの対策は今後の検討課題といえる^{9)・10)}。なお、FRPのアルカリ劣化に関するこれらの報告では、結合用樹脂が繊維束内部の空隙に十分に浸透していない顕微鏡写真がみられるが、メッシュに比べて太径となるFRP棒材では、結合用樹脂や試験条件に加えて、その製造法にも検討の余地があると考えられる。

4. 3 メッシュを使用したモルタルの物性

(1) 序説

脆性材料であるセメントマトリックスを連続繊維で補強する繊維補強セメント・コンクリートでは、ひびわれを多発させてその幅を小さくし、靱性を改善することが望ましく、ひびわれの数や幅を低減できれば、コンクリート構造物の耐久性も向上する。そのためには、高強度・高弾性繊維の使用、繊維量の増加、繊維とマトリックスとの付着性向上などが望まれる。このようなセメント系複合材料の強化機構としては、すでに述べてきたようにShah, Aveston Hannantらの金網によるフェロセメントやポリプロピレン繊維によるNETCEMを対象とした研究があるが、靱性や繊維補強材との付着性を高めるポリマーセメントモルタルと、ガラス繊維や炭素繊維などの比較的伸び能力の小さい高強度・高弾性型連続繊維を樹脂などで結合させた補強材との組合せに関する研究例はほとんどみられない。

したがって、本章における諸試験方法に標準化されたものはなく、様々なコンクリートの試験方法を参考に、永久型枠製品用として簡便に利用できることを念頭に置いて、供試体作製、試験方法などに工夫して各種性状の調査を行った。

構造物の耐久性確保のためには、その表層部に配される永久型枠の役割は重要となり、それ自体の耐久性に加えて、鉄筋コンクリートと一体化して設計上許容されるひびわれを低減する必要がある。埋設用のモルタルと現場打ちコンクリートとの一体性は、第5章および第6章で検討することとし、ここでは、繊維メッシュを混入したモルタルの強度特性を中心に、モルタルとコンクリートとの一体性にも関与する乾燥や温度による長さ変化なども調査することにする。

(2) 実験の概要

本実験では、ガラス繊維、炭素繊維およびビニロン繊維の3種の素材からなるメッシュ、およびメッシュサイズ（網目間隔）やメッシュを構成する単繊維を束

ねた糸の太さを大、中および小とした3種のメッシュ、第2章で取り上げた様々なポリマー系混和材料や骨材などの種類や使用量などを変化させ、作製したモルタル板の直接引張試験、曲げ試験、圧縮試験、衝撃試験、乾燥収縮試験、熱膨張試験、透気試験などを行い、これらが諸性状に及ぼす影響を調査した。

ここで、本研究を通して使用したメッシュの品質を表-4.1に示す。実験では、まずメッシュの力学性状を把握するための引張試験を行った。この試験では、25×250mmの寸法に切りそろえたメッシュ供試体（载荷方向繊維束；1～5本）の両端部表裏両面にアルミニウム板の補強用タブをエポキシ樹脂系接着材で貼り付け、表裏両面中央部にグリッド幅の小さい細線用ひずみゲージを接着し、変位制御型载荷試験機に装着した定位置つかみ具に挟みこみ、载荷速度1mm/minで荷重とひずみを測定した。供試体のつかみ部に使用した補強用アルミニウム板は、1×25×75mmの寸法で、接着性を高めるために塩酸水溶液や水酸化ナトリウム水溶液に浸漬し、化学反応で粗面化して洗浄乾燥させた。なお、ビニロン繊維では、厚紙と酢酸ビニル樹脂系接着材を補強に使用した。使用したメッシュ供試体および引張試験状況を各々写真-4.1および写真-4.2に示す。

以下に、モルタル供試体による諸試験方法を簡単に説明する。

直接引張試験は、10×50×400mmモルタル供試体の両端部表裏両面に酸またはアルカリ水溶液で粗面処理を施した1×50×75mmアルミニウム板の補強用タブをエポキシ系樹脂接着材で貼り付け、両側面に変位計を装着し（中央標間200mmの変位測定）、あるいは両面中央部に長さ60mmの塑性ゲージを接着して、変位制御型载荷試験機の平面状締付け型引張つかみ具に挟みこみ、载荷速度1mm/minで荷重-変位関係を測定する方法で行った。その供試体形状および試験状況を各々図-4.4および写真-4.3に示す。なお、一部の実験では万能試験機とくさび形定位置つかみ具を使用した。

曲げ試験は、引張試験と同じ寸法のモルタル供試体を変位制御型载荷試験機の曲げ治具に取り付けて支間300mmの3等分点载荷法で行った。その試験状況を写

表-4.1 メッシュの品質

略号	繊維	集束材	メッシュサイズ [*] (mm)	繊維径 (μm)	繊維本数 (本/束)	織り方
C	炭素	エポキシ樹脂	10.0	7	6000	平織り
V	ビニロン	エポキシ樹脂	7.5	14	1000	平織り
GL	Eガラス	エポキシ樹脂	14.3	13	9600	からめ織り
GM	Eガラス	エポキシ樹脂	5.2	13	1600	からめ織り
GS	Eガラス	エポキシ樹脂	3.6	9	675	平織り
G	ARガラス	PAE系ポリマー(P)	12.5	13	2000	からめ織り

真-4.4に示す。また、一般的な熱帯材合板との比較検討のため、 $10 \times 200 \times 1200$ mmモルタル供試体を作製するとともに、 $12 \times 200 \times 1200$ mm合板供試体を通常サイズの三六板から切り出し、支間900mmの3等分点荷重法による曲げ試験も行った。この荷重には鋼材を使用し、これを供試体上に順次載せる荷重法とした。

圧縮強度は $25 \times 40 \times 40$ mm供試体を $25 \times 100 \times 400$ mmモルタル平板から切り出し、 $10 \times 40 \times 40$ mm鋼製荷重板を介して万能試験機で荷重試験を行った。

衝撃試験では、 $10 \times 50 \times 200$ mmモルタル供試体の 10×200 mm面を下方として支

点の $\phi 15$ mmみがき丸鋼に挟み込んで支間150mmとなるように取り付け、 $\phi 50$ mmステンレス鋼球(540g)を振り子式で衝突させる曲げ衝撃法を採用し、変位計による残留変位や目視観察でひびわれ発生や破壊の状況を調査した。この試験方法および試験状況を各々図-4.5および写真-4.5に示す。また、モルタル板をコンクリートに埋設した場合の耐衝撃性を評価するために、 $10 \times 100 \times 400$ mmモルタル板をサンドイッチ状に埋設した $100 \times 100 \times 400$ mmコンクリート供試体を作製し、重錘落下(質量;6.62kg, 落下高;150mm)による支間300mmの曲げ衝撃法も行った。この試験状況を写真-4.6に示す。

乾燥収縮試験は、 $10 \times 50 \times 400$ mmあるいは $25 \times 50 \times 400$ mmモルタル供試体にコンタクトチップをエポキシ樹脂系接着材で貼り付けてダイヤルゲージでひずみを測定するコンタクトゲージ法(JIS A 1129)で行った。

熱膨張試験は、 $25 \times 100 \times 400$ mmモルタル供試体および $50 \times 100 \times 400$ mmコンクリート供試体を水槽内の温水に浸漬し、水温を 20°C から 50°C まで上昇させた後 50°C から 20°C に冷却し、その間で水温が20, 35および 50°C に達した時点でその温度を

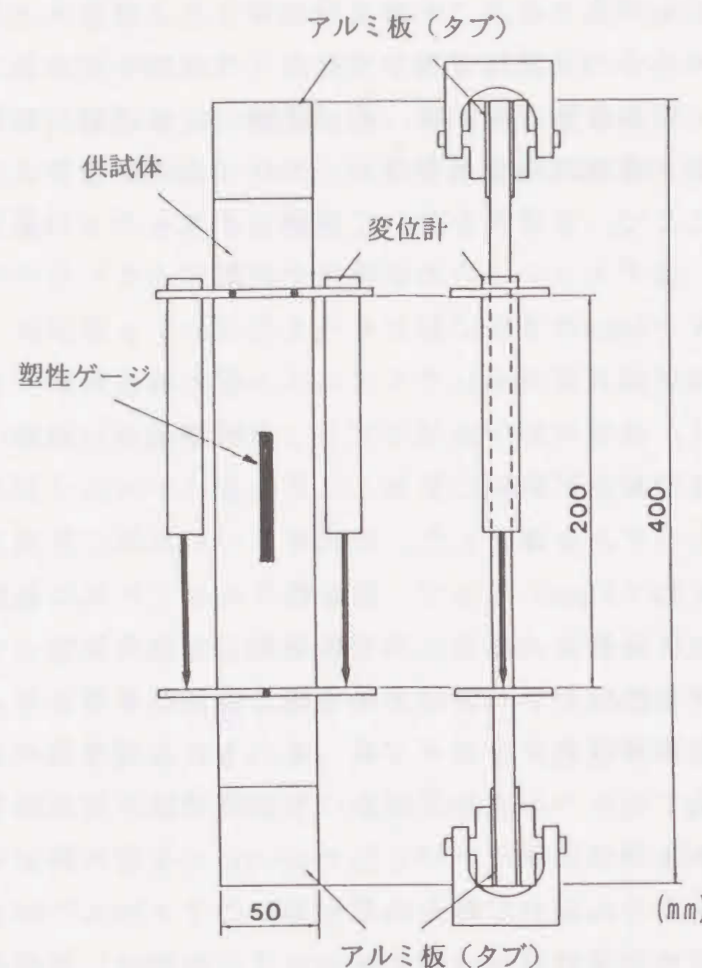


図-4.4 モルタルの引張試験

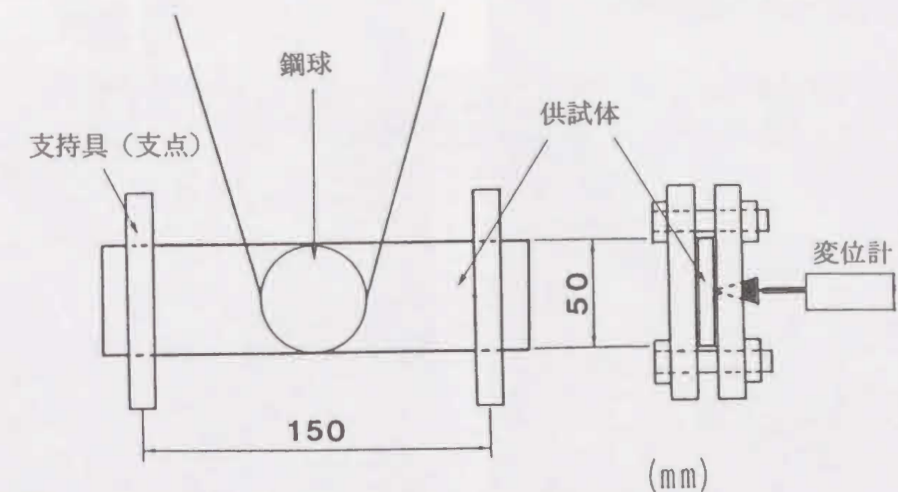


図-4.5 モルタル板の衝撃試験

1時間保ち、伸縮ひずみの測定をコンタクトゲージ法で行った。

透気試験は、強制乾燥させた $10 \times 150 \times 150$ mmモルタル供試体の表裏両面にゴム板パッキンを介して内径 $\phi 50$ mmの塩化ビニル樹脂製キャップをクランプで押し当て、一方から窒素ガスを 0.3MPa の圧力で供給し、片方に通過するガス量を水で満たしたメスシリンダーで測定した。なお、供試体のガス透過面($\phi 45$ mm)以外はエポキシ樹脂系接着材でコーティングを行い、供試体を透過するガス量の測定は定常状態になってから5分間行った。

この試験方法および試験状況を各々図-4.6および写真-4.7に示す。

以上で使用した板状モルタル供試体は、平打ち成形、あるいは板側面を底部とした縦打ち成形で作製したが、積層するメッシュは、スペーサあるいはセパレータとして同じメッシュから切り取った小片を使ってエポキシ樹脂系接着材で組み立て、供試体用の型枠内に配し、そこへモルタルを流込んで成形した。なお、平打ち成形法で製造したモルタルは、表面に凹凸やポリマー層が若干生じるので、引張試験や透気試験などに使用する供試体は、材齢7日までの湿潤養生中に、水に浸したカーボランダム(80番)により、鋼板上で研磨して表面を平滑にした。

試験結果は各条件あたり3個以上の供試体から得られた測定値の平均値とした。

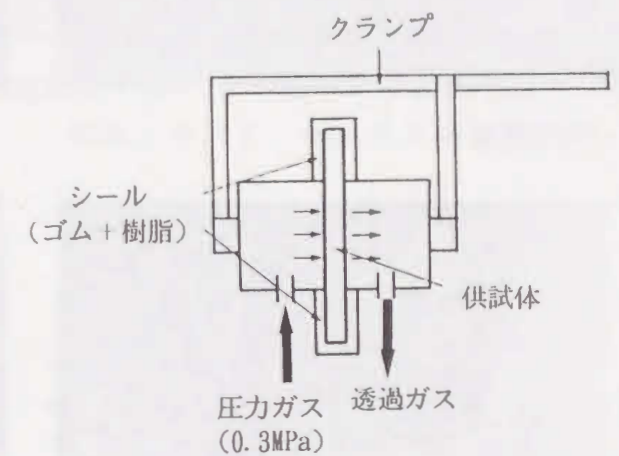


図-4.6 モルタルの透気試験

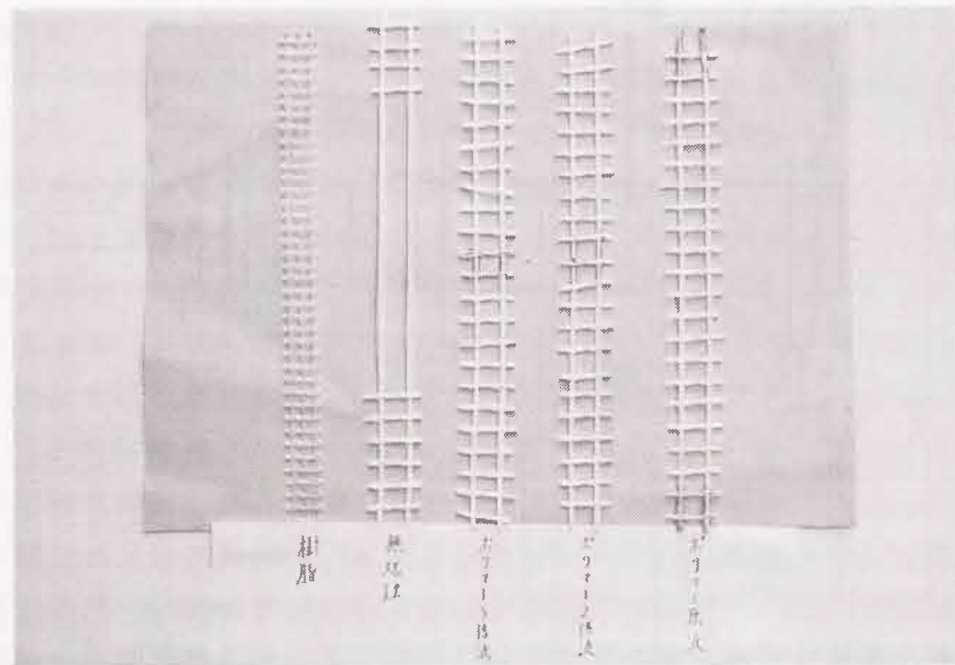


写真-4.1 引張試験用メッシュ供試体

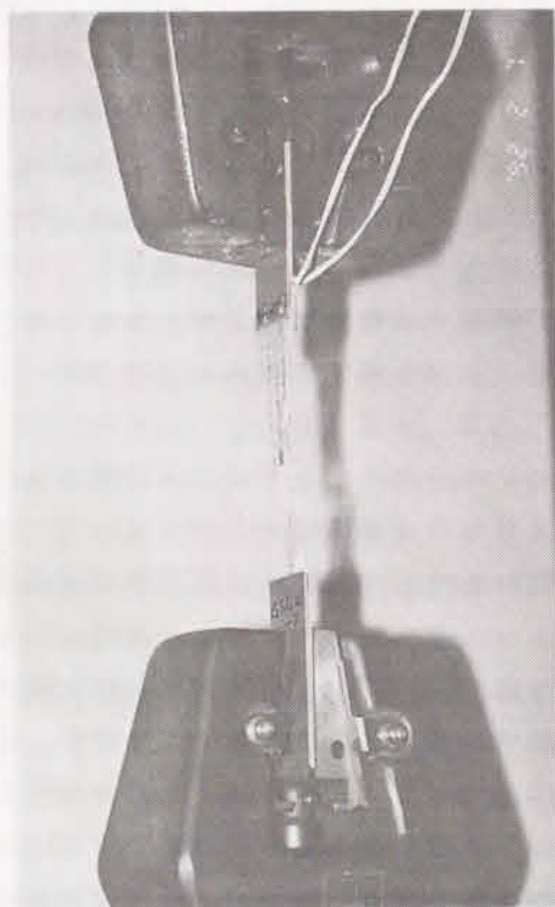


写真-4.2 メッシュの引張試験

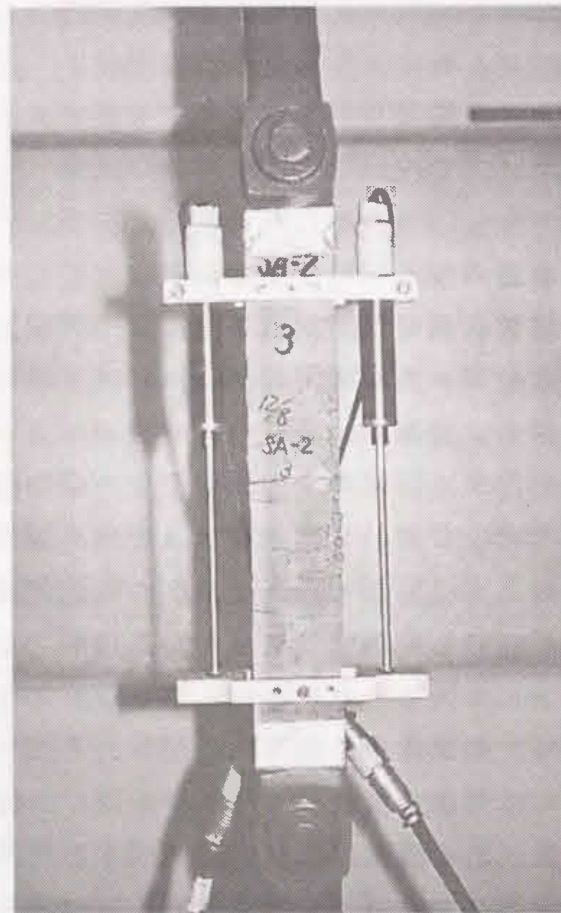


写真-4.3 モルタルの引張試験

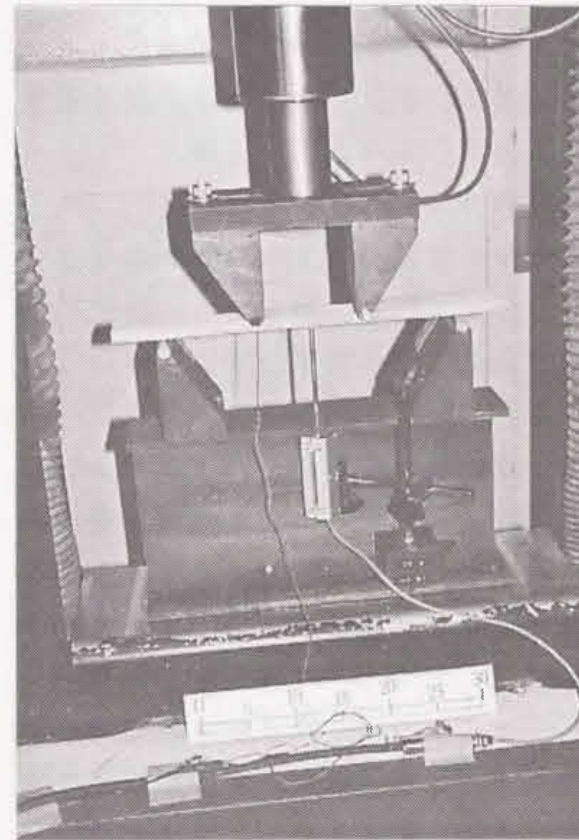


写真-4.4 モルタルの曲げ試験

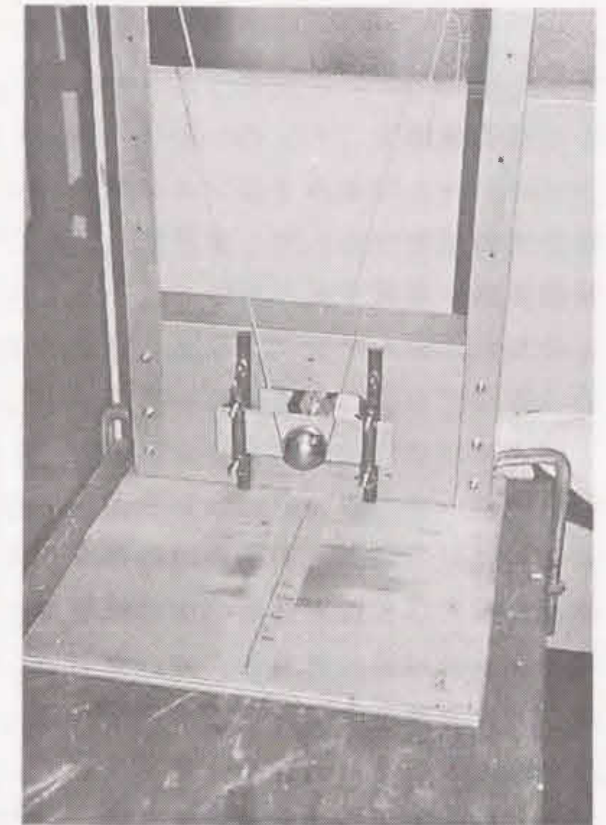


写真-4.5 モルタルの衝撃試験

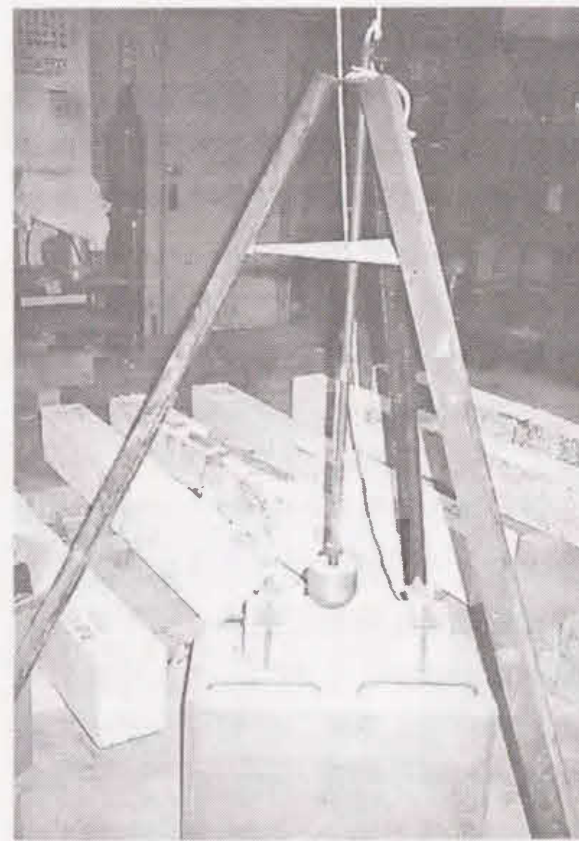


写真-4.6 複合体の衝撃試験



写真-4.7 モルタルの透気試験

(3) 実験の結果と考察

1) 引張強度

モルタルにおけるメッシュの補強効果を検討するには、使用する連続繊維の素材や使用量、メッシュの形状、モルタルマトリックスの品質などを検討する必要がある。

図-4. 7は、各種メッシュの引張荷重-ひずみ曲線の一例を示したものである。この試験は漸増繰返し載荷法で行ったが、炭素繊維やガラス繊維のメッシュは、数回の繰返し載荷では残留ひずみをほとんど生じることなく、破断までほぼ弾性的な挙動を示すことがわかる。しかし、これらよりも柔軟なビニロン繊維では、繊維束の中で部分的な引き抜けや破断が起きたためか、比較的大きな残留ひずみを生じ、応力-ひずみ関係も曲線となる傾向がみられる。これは、メッシュを構成する繊維束の結合力、試験装置におけるメッシュの定着法、ひずみゲージの性能やその接着法などに問題があるといえるが、これらの傾向は、ポリオレフィン系繊維でもみられるので、合成繊維の特徴とも考えられる。なお、図中の縦軸は荷重としたが、表-4. 1に示している繊維径や繊維本数からもわかるように、3種のメッシュの繊維束（ヤーン、ストランド、ローピングなどとも呼ばれる）1本あたりの繊維体積量に大差がなく、第2章や前節で説明したように、炭素繊維では強度や弾性係数が高いものの伸び能力が小さいこと、ビニロン繊維では伸び能力は高いものの強度や弾性係数が小さいことなどが掌握できる。

コンクリートは、脆性材料であり、粗骨材の粒径を考慮した寸法の供試体も使わなければならないので直接引張試験が実施困難であるが、この欠点を逆手にとり、JIS A 1108に規定されているように、品質管理用圧縮強度試験と同じ供試体や装置が使える円柱供試体での割裂引張試験が行われる。しかし、永久埋設型枠用ポリマーセメントモルタルは、薄肉断面で、細粒砂を骨材に使用し、連続繊維メッシュやポリマーの利用によりモルタルの引張強度や靱性が高いなどの特徴があり、新しい試験方法を考える必要がある。JCIの「ポリマーセメントモルタルの引張強さ試験方法（案）」では、ASTM C 190に規定のある中央がくびれたブリ

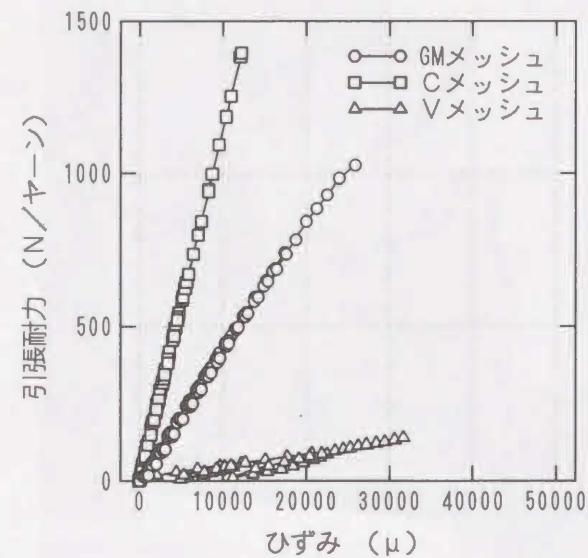


図-4. 7 メッシュの引張性状

ケット形供試体を採用しているが、メッシュを使用する本研究では、日本 GRC工業会が提案しているアルミニウム板接着引張試験方法を採用し¹⁰³⁾、使用するアルミニウム板を酸やアルカリで反応させて接着材がなじむように粗面化すること、アルミニウム板の接着面をつかみ具のチャック部よりも長くしてチャック部やその近傍で破壊しやすい供試体を補強すること、供試体のひずみ測定用に変位計および塑性ゲージを使用することなどの改良を施した。このアルミニウム板接着法は、耐水速硬型のエポキシ樹脂系接着材や変位計の使用で、湿潤状態の供試体についても適用可能となる。

10mm厚のモルタル板中にビニロン繊維メッシュを5枚～10枚配した供試体による引張試験結果および乾燥収縮試験結果を表-4. 2に示す。これらの結果は、アルミニウム板などで補強せず、鋼製つかみ具の供試体と接する面に硬質ゴム板をクッション材として接着した装置による材齢28日での引張試験と¹⁰⁴⁾、コンパレータ法（JIS A 1129）による材齢7日以降35日までの乾燥養生における乾燥収縮試験から得られたものである。なお、靱性係数は引張ひずみが0%～1%の間の平均引張応力で表した。

この表より、アクリル系ポリマーの使用は、ひびわれ発生時の強度、ひずみ、靱性などを増大させること、ビニロン繊維の使用は、ひびわれ発生時の強度を多少低下させるがひずみは若干増加させ、最大強度や靱性を著しく高めることなどがわかる。また、ブリーディングの抑制効果があり、内部組織を密化して空隙を小さくするとともに粘り強くするポリマーの使用で乾燥収縮が若干大きくなること、柔軟性のあるビニロン繊維には乾燥収縮の抑制効果があり少ないことなども確認できる。ひびわれ発生時の強度低下は、メッシュの使用でモルタルの充てん性が悪化することや多少存在するブリーディング水がメッシュ下面に留まるこ

表-4. 2 モルタル板の引張試験結果および乾燥収縮試験結果

供試体の略号 モルタル-メッシュ (配合種類・枚数)	直接引張試験					乾燥収縮試験	
	ひびわれ 発生強度 (MPa)	ひびわれ 発生ひずみ (μ)	最大強度 (MPa)	靱性係数 (1%ひずみ) (MPa)	ひびわれ数 (20cm間) (本)	長さ 収縮率 (%)	質量 減少率 (%)
PL0M01K45-V00	4.42	144	4.42	0.03	1.0	0.161	4.53
PL0M01K45-V05	3.65	160	8.09	3.21	15.6	0.182	4.73
PL0M01K45-V10	4.12	236	17.99	5.25	33.8	0.151	5.55
A10M01K36-V00	7.61	486	7.61	0.20	1.0	0.181	6.50
A10M01K36-V05	6.81	504	9.08	5.62	4.0	0.151	7.29
A10M01K36-V10	6.98	610	17.62	6.64	21.0	0.148	7.11
A20M01K30-V00	7.90	572	7.90	0.23	1.0	0.209	5.39
A20M01K30-V05	7.32	602	8.79	5.38	3.2	0.190	5.79
A20M01K30-V10	7.25	786	17.73	7.05	18.8	0.205	6.49

などによると思われるが、このことは質量変化からも推測できる。

なお、ひびわれ本数は、ひびわれ抵抗性に改善効果のあるメッシュの使用枚数が多いと増えるが、ポリマー結合材比の増加に伴って減少する。これはポリマーによる付着力、延性、強度などの改善効果と思われる。

この試験で採用した直接引張載荷法では、多くの供試体が装置のつかみ具の部分やその近傍で初期ひびわれを生じたため、供試体数を多くするなどの対処が必要となった。そこで、載荷試験前に供試体の補強という手間を要するが、アルミニウム板を用いる手法で以後の引張試験を行った。

モルタル板の引張試験で得られた応力-ひずみ関係を図-4.8~図-4.11に示す。

これらより、粗面処理を施したアルミニウム板を供試体つかみ部の補強材として用いる直接引張試験法が、モルタル板の応力-ひずみ関係を評価するのに適したものであることがわかる。なお、モルタル板のひずみ測定には、変位計と塑性ゲージを使用した。塑性ゲージが断線するような大きなひびわれを生じない程度に繊維量を高めたものでは、両者の測定値間に顕著な差異はみられなかった。また、非接触型のレーザー変位計の開発が急速に進んでおり、現状では非常に高価であり、この利用法は今後に期待したい。

また、これらの図より、メッシュを使用したモルタル板では、ひびわれ発生まで続くモルタルマトリックスとメッシュとの一体化区間、ひびわれ多発区間および荷重をメッシュだけで受け持つ区間の3領域が確認でき、比較的剛性の高いガラス繊維メッシュをポリマーセメントモルタルに比較的多く使った場合、ひびわれ多発区間でも耐力の増加がみられ、前節で述べた弾性付着モデルに近くなるが、これは付着力の影響によるものといえる。

ガラス繊維の形状に関する図-4.8より、引張抵抗性の改善には、メッシュサイズを小さくして繊維束の細かいものを多数積層するのが有効であることがわかる。太い繊維束のガラス繊維メッシュでは、載荷試験中に付着破壊を生じ、終局強度がメッシュの引き抜けによるものとなる傾向がある。なお、小さなメッシュサイズのガラス繊維では、応力-ひずみ関係が大きな曲線を描くが、これは平織りされた繊維束が湾曲した状態で樹脂接合されており、これがモルタル中で引張力によってまっすぐに伸びる影響と思われる。

また、剛性や強度の高い炭素繊維メッシュを使用した場合、モルタル板の終局強度も高くなるが、図に示した供試体以外のものでは1%よりも小さいひずみで付着破壊を起こし、靱性的に問題のあることが確かめられた。この付着破壊は、炭素繊維の束を固めた樹脂とモルタルとの接着力、直線状に平織りされた繊維束の摩擦力などが低いことに関係するものと思われる。一方、同様な寸法のガラス繊維では、比較的付着破壊を起こさなかった。これは、からめ織りによるメッシ

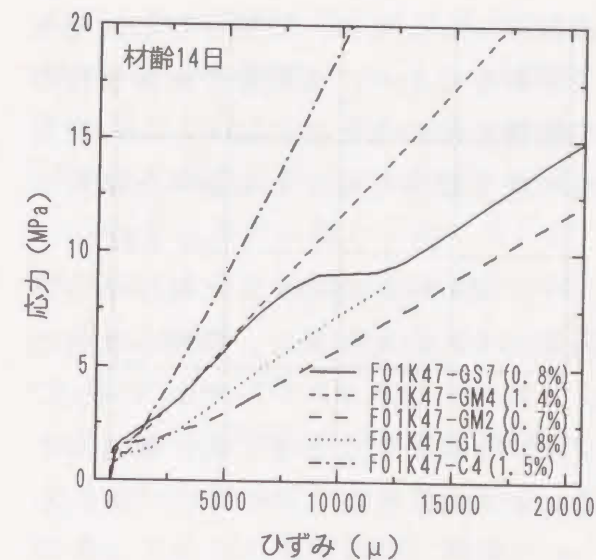


図-4.8 モルタルの引張性状(1)

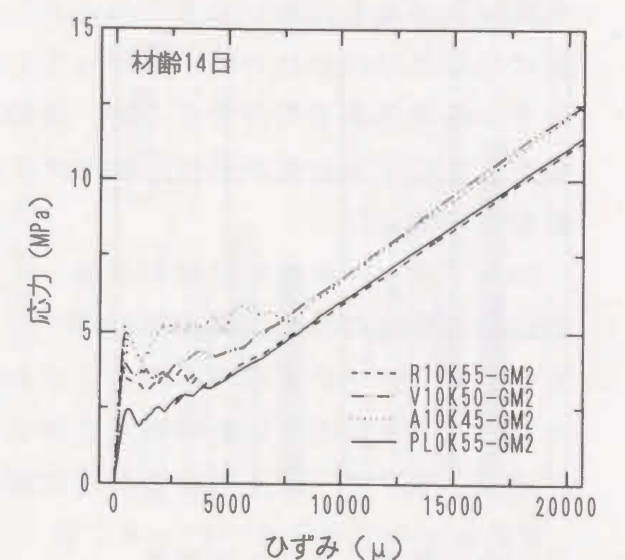


図-4.9 モルタルの引張性状(2)

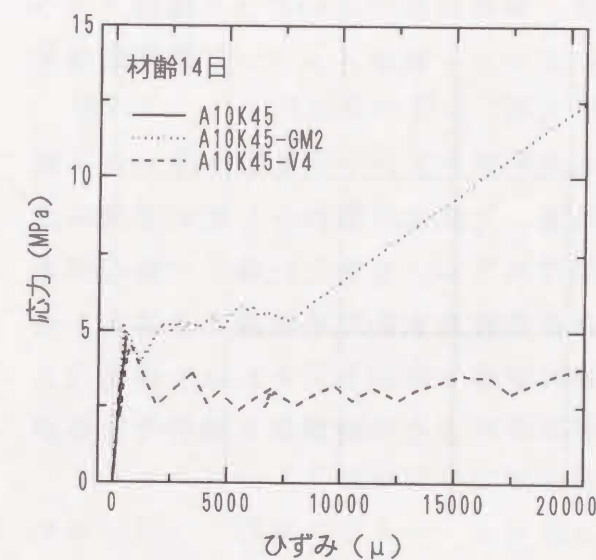


図-4.10 モルタルの引張性状(3)

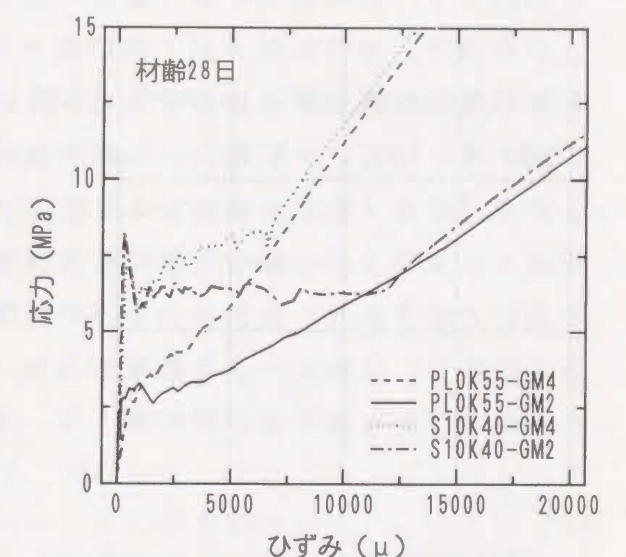


図-4.11 モルタルの引張性状(4)

ュとモルタルとの摩擦効果やメッシュの結合効果などが考えられる。

ポリマー混和材に関する図-4.9より、ポリマーの使用で、プレーンモルタルに比べてひびわれ発生強度を増大することがわかり、ひびわれ多発域も拡大されるので靱性改善にも非常に有効であるといえる。これらの効果は、SBR系およびEVA系のポリマーディスパーションよりもSA系やPAE系などといったアクリル系のポリマーディスパーションの方が大きいといえる。

ビニロン繊維メッシュに関する図-4.10より、初期ひびわれ発生とともに破断するモルタルの靱性改善には、メッシュの使用が非常に有効といえる。しかし、

引張強度が低くて伸び能力の高いビニロン繊維メッシュでは、初期ひびわれ発生後に生じたひびわれの幅が広がっても耐力を保持するため、変形能や耐衝撃性の大きな改善効果を期待できるが、終局強度や剛性を高めるためにはメッシュ使用量を大きくする必要があり、モルタル板の成形性や経済性などとも絡めた検討が必要といえる。

SA系ポリマー混和材に関する図-4.11より、プレーンモルタルに対するひびわれ発生強度の改善効果が他のポリマーと同様かそれ以上に高く、靱性の改善にもSA系ポリマーが有効であることがわかる。これは、SA系ポリマーディスパージョンによる水結合材比低減効果に加えて、ポリマー粒子による充てん、凝集および造膜、ポリマー粒子の硬さなどに関係するといえる。

2) 曲げ強度および圧縮強度

モルタル板の曲げ試験で得られた応力-たわみ関係を図-4.12に示す。これより、メッシュの使用で、引張試験結果と同様にひびわれ発生後も高い曲げ耐力を保持でき、終局耐力や曲げ剛性の改善には、弾性係数の高いガラス繊維メッシュが有効で、弾性係数が低く伸び能力の高いビニロン繊維メッシュには変形能や耐衝撃性の改善効果を期待するのが良いといえる。

図-4.13は、一般的な12mm厚合板と10mm厚SA系ポリマーセメントモルタル板との曲げ荷重-たわみ曲線を示したものである。これは、型枠としての実用性に配慮して支間を900mmと大きくした試験結果であるが、合板と比較して断面が若干薄いモルタルは、たわみの小さい区間は曲げ剛性が高いために施工上有利となる。しかし、比較的小さな荷重で初期ひびわれが生じており、たわみを戻せばこれらのひびわれはふさがり、ポリマーやセメントによるゆ着効果も期待できるが、

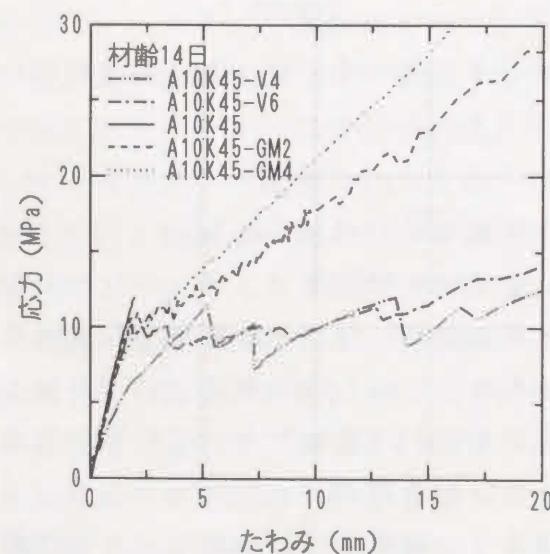


図-4.12 モルタルの曲げ性状(1)

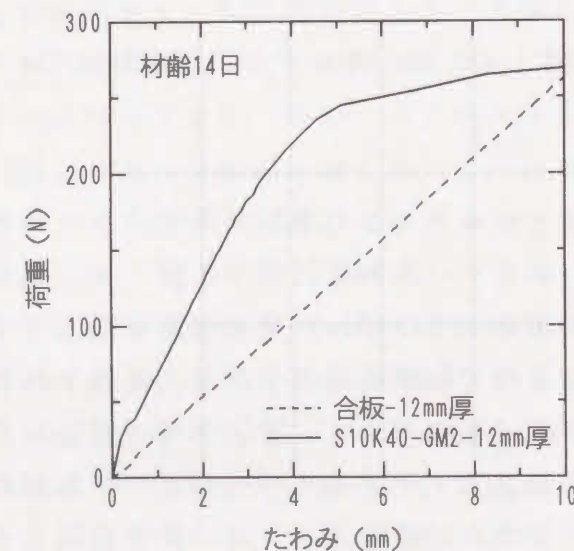


図-4.13 モルタルの曲げ性状(2)

高耐久性を求める場合には断面厚の増加、リブの設置、メッシュ補強材の増量などによってモルタル板の曲げ剛性を高める必要があるといえる。

25mm厚モルタル板から切り出した供試体による圧縮強度試験結果を図-4.14示す。この図からは、今まで述べてきたような、SA系ポリマーやフェロニッケルスラグ砂の使用による高い圧縮強度の改善効果がみられる。これらの強度には、繊維メッシュの使用によって多少低下する傾向がみられるが、これは弾性係数の小さい樹脂を使ったメッシュの使用による影響といえる。

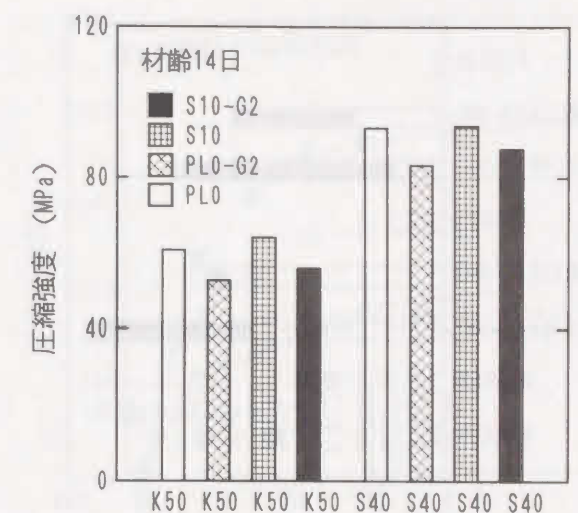


図-4.14 モルタルの圧縮強度

3) 耐衝撃性

薄肉モルタル埋設型枠製品では、型枠の製造、運搬および施工時に加えて供用中にも、交通荷重などによる衝撃、不可抗力的な車両や落下物などによる衝突などの作用を受ける可能性が高く、耐衝撃性は重要な性能の1つといえる。しかし、石綿スレートのJISなどのように製品固有の衝撃試験が規定されているものもあるが、一般的な耐衝撃性能を評価する標準的試験はない。そこで、本実験では、モルタル板としての振子式曲げ衝撃試験と、これを現場打ちコンクリートに埋設した複合体における重錘式曲げ衝撃試験とにより、耐衝撃性を評価することとした。

モルタル板による衝撃試験結果を図-4.15に示す。これより、プレーンモルタルに比べて各種のポリマーを使用したモルタルの耐衝撃性が高く、とくにPAE系で大きな改善効果がみられる。また、メッシュの使用は耐衝撃性を著しく増大させ、ひびわれ発生までは弾性係数の高いガラス繊維メッシュの使用が有効で、終局破壊に関しては弾性係数は低いものの伸び能力に優れたビニロン繊維メッシュが有効といえる。

モルタル板とコンクリートとの複合体による衝撃試験結果を図-4.16に示す。これより、ガラス繊維メッシュ補強SA系ポリマーセメントモルタル板の埋設は、コンクリートの耐衝撃性改善に非常に有効で、重錘の打撃面(上面)にのみ埋設した場合でも耐衝撃性を高めるが、その反対側の下面への埋設が効果的で、さらに上・下両面への埋設でその効果が高まるといえる。また、水結合材比低減効果があり、粒子自体が強硬で、鋭い角張りによる付着性も優れたフェロニッケルスラグ砂の使用でさらに耐衝撃性が向上することもわかる。

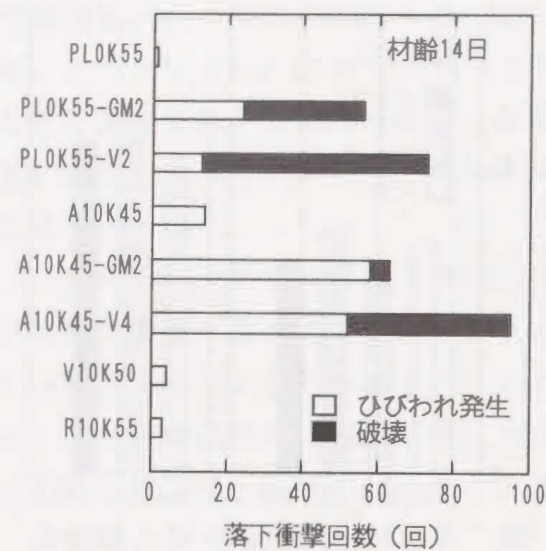


図-4. 15 モルタルの耐衝撃性

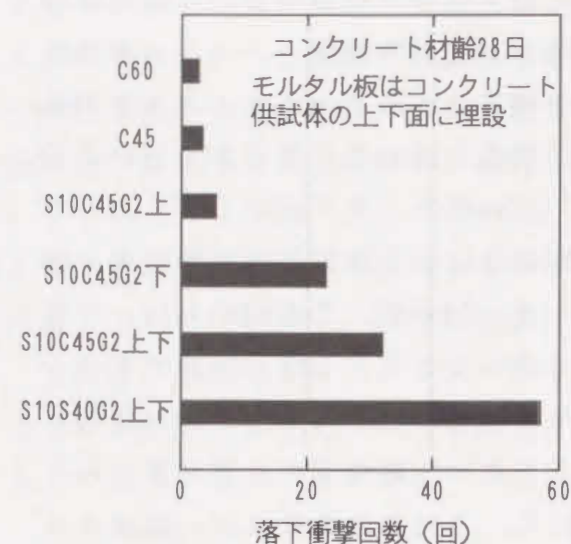


図-4. 16 複合体の耐衝撃性

4) 体積変化

湿度や温度による伸縮は、工場製品で重視される寸法精度、現場打ちコンクリートとの一体性などに悪影響がある。とくに、構造物外層に設置される永久埋設型では湿度や温度の影響を大きく受ける。

乾燥収縮試験で得られたモルタル板の乾燥収縮率を図-4. 17および図-4. 18に示す。これらより、通常のコンクリートに比べて単位水量の多いモルタル板の乾燥収縮率は1000 μ 程度以上とかなり大きく、薄肉幅広板の場合には縮みや反りなどの寸法精度に留意を要することがわかる。しかし、本実験では供試体に顕著なひびわれなどは起きず、工場製品としての出荷時には収縮が落ち着いた状態となるので、建設現場での使用に際してはコンクリートとの一体性などに大きな問題がないと思われる。なお、薄肉板状の永久埋設型では、工場で所定寸法よりも大きな板を作製し、これを切断して製品化することも可能である。

ポリマーやメッシュの影響を示した図-4. 17では、モルタルの乾燥収縮低減に、水結合材比を減じることのできるポリマーの使用や剛性の高いガラス繊維メッシュの利用が有効といえる。また、SA系モルタルにおける骨材やメッシュの影響を示した図-4. 18では、水結合材比を減じることのできるフェロニッケルスラグ砂の使用が乾燥収縮低減に有効で、収縮率の高い砕砂モルタルではガラス繊維メッシュの利用による拘束効果もみられる。

なお、乾燥収縮の低減あるいはケミカルプレストレスによるメッシュの補強効果を期待して膨張材の利用を試みる実験を行ったが、軽量化、断熱性、切断や釘打ちなどの作業性の改善を目的とした人工軽量細骨材や発泡ポリスチレンビーズの利用に関する実験と同様に、材料、配合、成形法などに改善の余地が大きく、

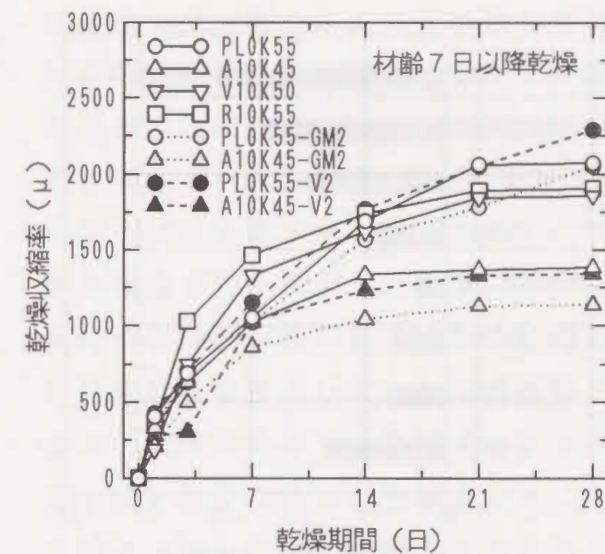


図-4. 17 モルタルの乾燥収縮(1)

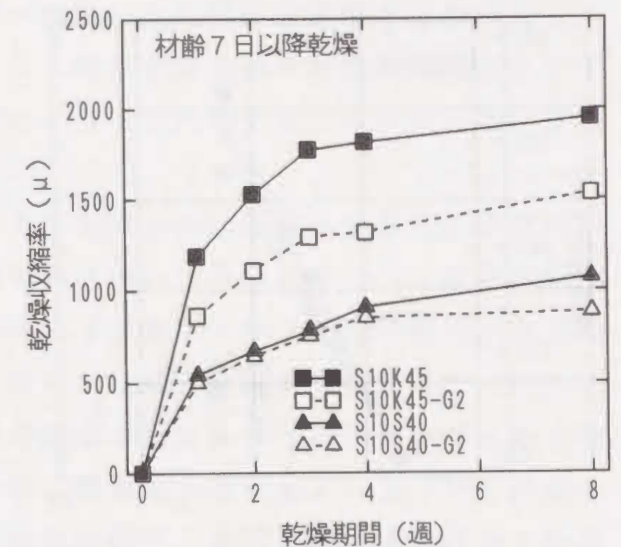


図-4. 18 モルタルの乾燥収縮(2)

公表するだけの実験結果を今のところ得ることができてはいないが、いずれも意義のある目的があり、今後の検討項目としたい。また、W/Cが小さくてセメント量が多く、ブリーディングをほとんど生じないポリマーセメントモルタルでは、セメントの水和反応に伴う自己収縮の配慮も必要であり、さらにポリマーの場合には、凝集や造膜時に生じる硬化収縮も考えられ、これらに関する検討も今後の課題といえる。

図-4. 19は、モルタル板の熱伸縮を示したものである。単位水量が多く、温度依存性の高いポリマーを使用したモルタルでは熱伸縮が問題となるが、この図より、ポリマー結合材比が0.10と比較的小さいモルタルの熱膨張係数は10~12 $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 程度でコンクリートと比べて若干高いものの大差はなく、剛性の高いガラス繊維メッシュや水結合材比の低減効果のあるフェロニッケルスラグ砂の使用で、これをある程度小さくできることがわかる。

5) 透気性

前章で説明したように、永久埋設型ではイオン、ガス、水分の遮へい性が重要で、この性状改善にはポリマー混和材の利用が有効となる。しかし、メッシュをモルタル内に配する場合、モルタルの充てん性が悪化したり、乾燥養生などでメッシュとモルタルとの界面にずれが生じる可能性もあり、遮へい性悪化の恐れもある。

コンクリートは、その内部にセメント硬化体として存在するゲルおよび毛細管空隙、ブリーディングによる水みちや骨材下面の空隙、連行気泡などを有する多孔体である。さらに豆板やすなどの施工不良による欠陥、外圧や乾燥による各

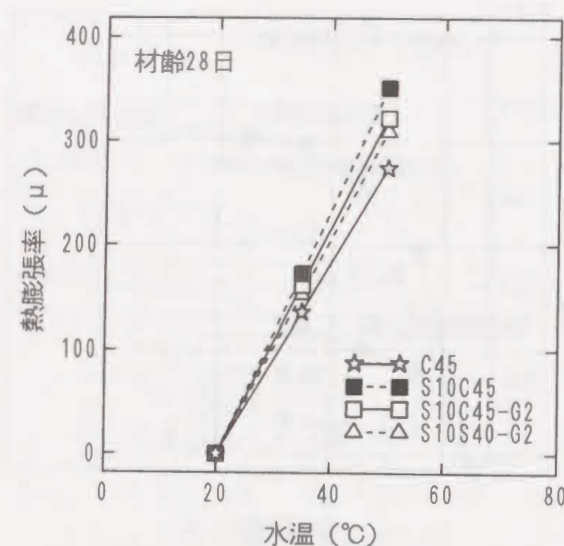


図-4.19 モルタルの熱伸縮

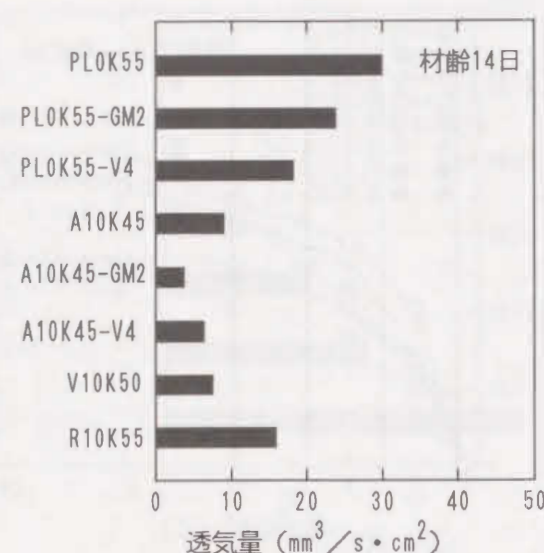


図-4.20 モルタルの透気性

種のひびわれなどの空隙も存在する。このような空隙を有するコンクリートでは、表面張力、圧力勾配、濃度拡散などにより、空隙を通路としてコンクリート内部にイオン、ガス、水分などの腐食因子が侵入する。したがって、透気・透水・吸水試験は、耐久性を評価するための重要な資料となる。しかし、JISには建築用のコンクリートブロック、石綿スレート、防水剤などの製品の品質試験として簡易的な透水試験法はあるが、標準的な試験方法はなく、一般に、定圧法、変圧法、減圧法などによる透気試験、アウトプット法（アメリカ開拓局の方法、他）、インプット法（DIN 1048の方法、他）などによる透水試験、吸水率法、表面吸水法、キャピラリー法などによる吸水試験などが利用されている。

モルタル板の透気試験で得られたガス透過量を図-4.20に示す。これより、プレーンモルタルと比較し、ポリマーの使用とくに水結合材比の低減効果、諸強度や靱性の改善効果の高いPAE系ポリマーの使用で気密性が大きく改善されることがわかる。また、モルタルの気密性はメッシュの使用でさらに高まるが、これは樹脂で結合されたメッシュ自体に気密性があること、ポリマーの使用によってかなり抑制されたブリーディングなどの材料分離をメッシュがさらに抑えることなどによるとと思われる。

(4) まとめ

メッシュを使用したモルタルの物性に関する本検討結果を以下に要約する。

①ガラス繊維や炭素繊維によるメッシュの引張試験、連続繊維メッシュ補強モルタル板の引張試験では、酸やアルカリの水溶液浸漬で化学的に粗面処理を施した

アルミニウム板とエポキシ樹脂系接着材で補強した供試体を使用するのが良く、ビニロン繊維メッシュでは厚紙と酢酸ビニル樹脂系接着剤の使用が有効で、ひずみの測定には、メッシュには細線用ひずみゲージが使用でき、モルタルでは変位計や塑性ゲージが利用できる。

②ビニロン繊維メッシュを10mm厚のモルタル中に5～10枚使用すると、ひびわれ発生強度が若干低下し、乾燥収縮低減効果もほとんどみられないが、終局引張強度や引張靱性の改善効果は非常に高くなり、PAE系ポリマーとの併用で、ひびわれ発生時の強度、ひずみおよび靱性が高まり、ひびわれ数が減少する。

③太い繊維束のガラス繊維メッシュや炭素繊維メッシュでは引張荷重が大きくなると引き抜けなどの付着破壊を生じやすく、繊維束が細くてメッシュサイズの小さいメッシュを多数積層するとモルタルの引張靱性は高まるが、成形性などが悪化するので、これらを考慮してメッシュ形状を選定する必要がある。

④連続繊維メッシュを使用したモルタル板の引張試験では、ひびわれ発生まで続くモルタルとメッシュとの一体化区間、ひびわれ多発区間およびメッシュだけで荷重を受けもつ区間の3領域が存在し、ガラス繊維メッシュやポリマーの使用で、付着弾性モデルの引張挙動に似たひびわれ多発区間での応力増加がみられる。

⑤メッシュの使用で、ひびわれ発生後も高い引張耐力や曲げ耐力を保持でき、終局強度の増進には剛性の高い炭素繊維メッシュやガラス繊維メッシュが有効で、ビニロン繊維には高い変形能や耐衝撃性の改善効果がある。

⑥ポリマーの使用は、モルタルのひびわれ発生時における強度、ひずみ、靱性の改善に非常に有効で、その効果はSBR系やEVA系のポリマーディスパージョンやポリマー系混和剤よりもSA系やPAE系のポリマーディスパージョンが高い。

⑦SA系ポリマーを使用したモルタルの圧縮強度発現性は比較的良好で、フェロニッケルスラグ砂の使用で圧縮強度は高まるが、樹脂で結合したガラス繊維メッシュの使用で多少低下する。

⑧ポリマーの使用でモルタルの耐衝撃性が向上し、その効果はSBR系やEVA系よりもSA系やPAE系のポリマーディスパージョンが高く、メッシュとの併用でそれが飛躍的に増大され、ガラス繊維メッシュではひびわれ発生まで、またビニロン繊維メッシュでは破壊までの衝撃吸収エネルギーを高める効果があり、これらの材料を用いたモルタル板を埋設したコンクリートの耐衝撃性も非常に改善される。

⑨モルタル板の乾燥収縮は、通常のコンクリートと比べてかなり大きいために薄肉幅広板とする場合にはひずみや反り、寸法精度などに注意を要するが、ひびわれなどに発展することはない、ポリマーやフェロニッケルスラグ砂の使用で水結合材比を低減したり、剛性のあるガラス繊維メッシュの利用でこの収縮をかなり低減できる。

⑩モルタル板の熱膨張係数は、コンクリートと比べて多少大きいが大差はなく、

ガラス繊維メッシュの使用や水結合材比低減効果のあるフェロニッケルスラグ砂の使用で熱伸縮を若干抑制できる。

⑪ポリマーの使用は、モルタルの気密性改善にきわめて有効で、樹脂で結合したメッシュの使用でもモルタルの透気性を小さくできる。

⑫ガラス繊維メッシュ補強ポリマーセメントモルタルでは、乾燥収縮低減、ケミカルプレストレス導入などのための膨張材の利用、軽量化や断熱性、くぎ打ちや切断の作業性などを目的とした人工軽量細骨材や発泡ポリスチレンビーズの利用は検討する価値が高い。

4. 4 メッシュの耐アルカリ性

(1) 序説

ガラス繊維は、耐火用あるいは建築用断熱材としての利用が多く、スペースシャトルのタイルあるいは光通信にも使用されているのは有名である。このように、経済的に断熱材や靱性を付加でき、成分調整による高機能化も可能となる補強材として、石こう、コンクリート、プラスチック、ゴムなどへも利用されている。このようなガラス繊維は、入手性、価格、比重、透光性、着色性、強度、弾性係数、伸度、靱性、付着性、断熱性、熱伸縮性、防食性、耐塩性、耐候性、耐熱性、加工性などに優れたバランスの良いモルタルの補強材となり得る。一方、炭素繊維では、価格、比重、色、伸度、せん断強度、付着性、熱伸縮性などに、またビニロン繊維には、比重、弾性係数、ポアソン比、耐熱性、熱伸縮性、耐候性などに問題が残る。

しかし、ガラス繊維にも、セメント硬化体中のアルカリ水によって劣化を起こし、汎用性の高い一般的なEガラス繊維はもとより、1973年にイギリスで商品化されたCemFIL（現在は製造権を取得した日本メーカーがアルファイバーの名称で製造・販売）、九州のシラスを原料とした国産品などのようにジルコニアの含有量を高める成分調整などを行った耐アルカリ（AR）ガラス繊維の場合でも、劣化は免れず、コンクリートを早期に乾燥養生に移したり、コンクリートのアルカリ度を抑える混和材の使用などを行う必要があることを、筆者らは過去に発表している¹⁰⁶⁾。

ポリマーセメントモルタル製埋設型枠では、製品製造時の乾燥養生、構造物表層への埋設、ポリマーによる繊維の保護効果などによって、ガラス繊維のアルカ

リ劣化が抑制されるという期待感もあるが、モルタル自体に単位セメント量が多く、構造物内部ならのアルカリの溶出なども考えられるため、ガラス繊維を補強材として使用するには、何らかのアルカリ劣化対策が必要となる。また、ガラスはコンクリートと同様に湿潤下での耐久性に問題があったり、繊維を束ねただけのメッシュでは、モルタルとの接触で起きる解糸や繊維間隙部への吸水が成形不良を招くことにもなる。

そこで、本研究では、繊維の耐アルカリ性や繊維束の結合力の改善のため、エポキシ系樹脂を圧力や熱で結合処理したガラス繊維メッシュを使用した。しかし、この処理には、特殊な装置を要し、エポキシ樹脂系結合材も非常に高価で、各種添加剤の使用や繊維の表面処理などを要するといった問題がある。

樹脂については、砥石などの補強用にも使われている比較的安価なフェノール樹脂を使ったガラス繊維メッシュの使用も試みたが、成分調整や熱処理などで耐アルカリ性を高めたものでもアルカリ水溶液と反応することが判明した。そこで、常温でも造膜するPAE系水性ポリマーディスパーションに浸漬して自然乾燥させる簡便な手法を考案し、その有効性を検討することとした。

(2) 実験の概要

実験では、エポキシ系樹脂を結合材（バインダー）として特殊な装置で圧力や熱などの処理を施したEガラス繊維メッシュとビニロン繊維メッシュ、さらに経済性や簡便性に着目してPAE系水性ポリマーディスパーションで浸漬乾燥処理したARガラス繊維メッシュを、NaOH（0.25規定）とKOH（0.25規定）の混合アルカリ水溶液（pH12～13）に所定期間浸漬後（浸漬液は8週ごとに交換）、メッシュの引張試験と同様に表面処理した1×25×75mmアルミニウム板タブをエポキシ系接着剤（ビニロン繊維メッシュでは厚紙と酢酸ビニル樹脂系接着剤使用）で補強し、くさび型定位つかみ具を装着した変位制御型載荷試験機で直接載荷試験を行い、引張耐力を求めた。なお、浸漬液にNaOHとKOHとを使用したのは、第1章でも述べたように、セメント硬化体中の細孔溶液には、セメント生成物の水酸化カルシウムではなく溶解度の高い Na^+ 、 K^+ 、 OH^- が多いこと、水酸化カルシウムの水溶液では、 Ca^{2+} が大気中の炭酸ガスと反応しやすいことなどを考慮したためである。

経済性や繊維束での浸透性などを考慮し、PAEポリマーディスパーションによる処理では、イオン交換水で希釈したディスパーションの使用効果も調査した。

引張試験用のメッシュ供試体数は各条件あたり5個以上とし、試験結果には測定値の平均値を使用した。

また、メッシュをニッパで引き裂いて得られた小片を試料として白金-パラジウムによる導電性処理を施し、走査電子顕微鏡による2次電子像観察も行った。

メッシュを用いたモルタル板の物性に関する実験より、メッシュサイズの小さなものが付着性などの点で有利となる結果を得ているが、エポキシ系樹脂結合材で処理した5mm程度のメッシュサイズのものを積層したモルタルに火炎放射をした際、メッシュとモルタルとが比較的容易に剥離したため、成形時のモルタル充てん性、メッシュの付着性、経済性なども加味し、ポリマー処理を行う実験では、繊維束の単繊維数を2000本とし、メッシュサイズを12.5mmと広目のものを使用した。

(3) 実験の結果と考察

コンクリート用連続繊維補強材の結合材にはエポキシ、不飽和ポリエステル、ビニルエステルなどが利用されているが、浸漬試験などの耐久性試験では、一般的に浸漬液温を高めるなどの促進試験が行われる。しかし、樹脂などと水酸基を有するアルカリ水との反応は非常に複雑で温度依存性もきわめて高く、エステル基を有する樹脂やエポキシ樹脂では50℃程度の温度で、その性状を急激に変える熱変形温度が存在するとの指摘があり¹⁰⁾、常温(20±5℃)で行った。

結合材としては、塗料や接着材としてコンクリートへの使用実績の長いエポキシ樹脂系のものを使用するとともに、簡便な結合処理という観点から使用したポリマーディスパージョンは、ポリマーセメントコンクリート用混和材として実績のあるPAE系としたが、弱アニオン性粒子荷電のディスパージョンを特殊乳化重合法で分散安定化させ、ガラス、砂、木材などのアニオン性物質への付着性に優れ、セメント、カルシウム、アルミニウムなどの多価カチオン性物質との混和性にも優れたものが最近開発されたので、これを使用した。

エポキシ樹脂系結合材を用いたメッシュの耐アルカリ試験結果を図-4.21に示す。この実験で使用したガラス繊維はアルカリ劣化を起こすEガラス繊維であるが、エポキシ系樹脂結合材の使用で2年程度のアルカリ水溶液浸漬では劣化を生じないことがわかる。また、図には示していないが、最近得られたアルカリ浸漬5年後の結果でも、耐力低下や変色などの変状がないことを確認している。

また、ビニロン繊維メッシュも、アルカリ劣化を起こさずに一定の引張耐力を保持することがわかる。しかし、ビニロン繊維では、繊維に吸水性があること、

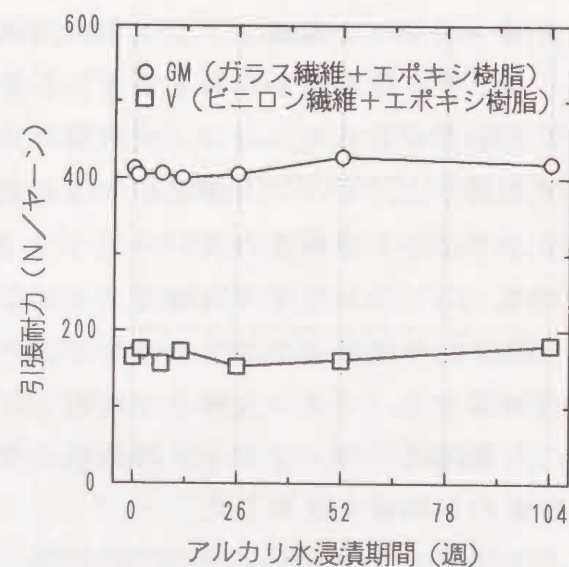


図-4.21 メッシュの引張耐力(1)

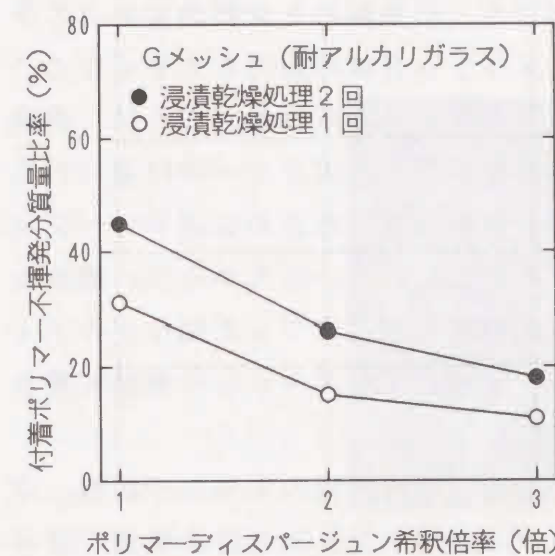


図-4.22 メッシュのポリマー処理

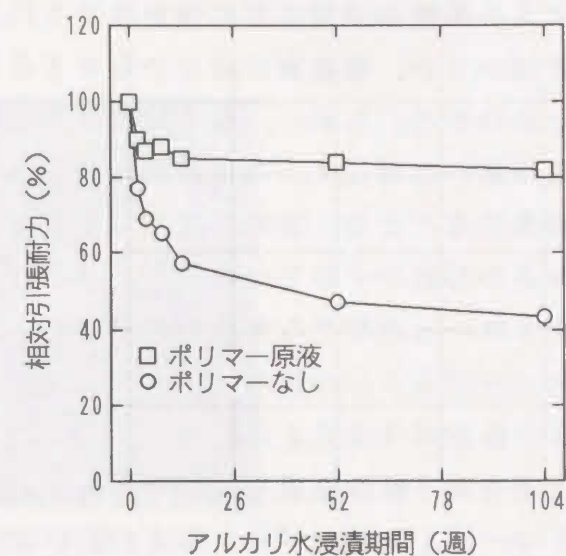


図-4.23 メッシュの引張耐力(2)

エポキシ樹脂処理前段階で繊維束にアクリル系収束剤が若干付いているために樹脂結合材が繊維間隙に十分浸透できないこと、繊維自体もしなやかでエポキシ樹脂による結合が十分ではないことなどのため、浸漬中にメッシュが軟化して解糸する現象がみられた。したがって、ビニロン繊維の優れた耐アルカリ性は、繊維自体が有する特性といえる。

以上のような安定な引張耐力を得たことから、ガラス繊維の場合には酸やアルカリで粗面処理したアルミニウム板とエポキシ系接着剤とによる供試体の補強、ビニロン繊維の場合には厚紙と酢酸ビニル系接着剤とによる供試体の補強により、メッシュの引張試験が可能となる。

図-4.22は、PAE系水性ポリマーディスパージョンによる浸漬自然乾燥処理で、ガラス繊維に付着するポリマー不揮発分量を示したものである。エポキシ樹脂系結合材によるガラス繊維メッシュの処理は、耐アルカリ性改善に有効だが、樹脂が高価で特殊な製造装置や様々な添加剤を要する。したがって、エポキシ樹脂よりも安価で、簡単に処理できるPAE系水性ポリマーディスパージョンによる浸漬自然乾燥処理を考案した。また、材料コストの低減や繊維間隙への浸透促進のため、水の粒子を小さくし浸透を助けるといわれているイオン交換水でディスパージョンを希釈する手法を考えた。この図より、イオン交換水での希釈倍率や浸漬回数により、ガラス繊維メッシュに付着させるポリマー量を自由に操作ができ、重要度に応じた利用が可能となることがわかる。

PAE系ポリマーで処理したメッシュの引張試験結果を図-4.23に示す。これより、結合材を用いない耐アルカリガラス繊維メッシュは、浸漬期間が延びるにつれて引張耐力が低下してアルカリ劣化を生じるが、ポリマーディスパージョン

による簡便な浸漬自然乾燥処理でこれを抑制でき、引張耐力を比較的安定とできるばかりか、繊維束の結合力も高まるためにメッシュ自体の耐力も大きくなることがわかる。しかし、浸漬初期で多少強度低下の傾向もみられる。これは、繊維束内部へのポリマーの浸透が完全ではなく、繊維表面へのポリマーの付着にむらが生じることや、造膜温度20℃のポリマーを自然乾燥させたためにポリマーフィルムが十分ではないことなどによるものと思われる。したがって、繊維とポリマーとのなじみをさらに良くする繊維表面処理用カップリング剤などのディスパーションへの添加、ディスパーションへどぶ漬けしたメッシュの強制乾燥などの検討が今後考えられる。

走査電子顕微鏡観察で得られたアルカリ水溶液浸漬12週後のエポキシ樹脂、ポリマーディスパーション原液およびポリマーディスパーション3倍希釈液で結合させた耐アルカリガラス繊維メッシュの内部組織を写真-4.8に示す。これからも、繊維の結合性や保護機能に樹脂やポリマーディスパーションが有効となることが確認できる。なお、樹脂やポリマーディスパーションを使用しないメッシュについてもアルカリ浸漬後1年経過時点で観察を行った結果である写真-4.9からも、繊維径の減少や形状の変化などは明確には確認できなかった。

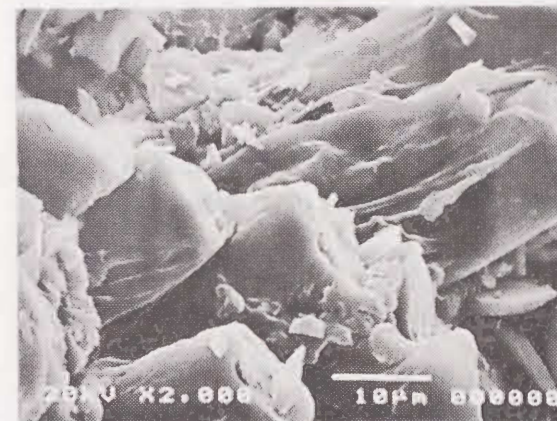
(4) まとめ

メッシュの耐アルカリ性に関する本検討結果を以下に要約する。

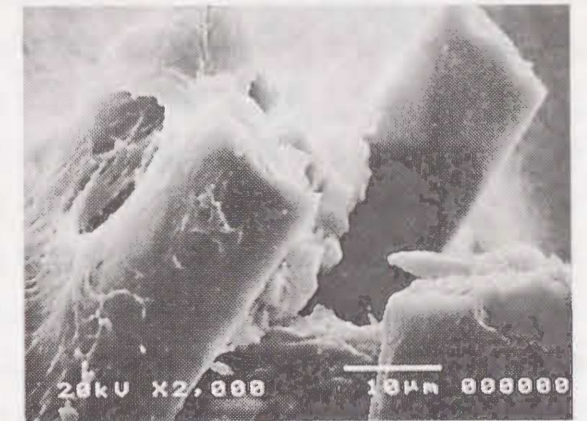
- ① エポキシ樹脂系結合材を使用したEガラス繊維メッシュは、アルカリ水溶液浸漬後数年間アルカリ劣化を起こさず、同じ引張耐力を保持し変色などの変状も起さない。
- ② エポキシ樹脂系結合材を使用したビニロン繊維メッシュは、アルカリ水溶液浸漬後数年間引張耐力の低下を起こさずに変色などもしないが、吸水作用でメッシュの形状が崩れる。
- ③ カチオン型ポリマーディスパーションによる浸漬自然乾燥処理は、イオン交換水での希釈倍率や浸漬回数によって耐アルカリガラス繊維メッシュに付着させるポリマー量を自由に操作ができ、重要度に応じた利用が可能となる。
- ④ 結合材を用いない耐アルカリガラス繊維メッシュは、浸漬期間が延びるにつれて引張耐力が低下するが、ポリマーディスパーションによる簡便な浸漬自然乾燥処理でこのアルカリ劣化を抑制でき、繊維束の結合力も高まるためにメッシュ自体の耐力も高まる。
- ⑤ 走査電子顕微鏡観察より、エポキシ樹脂やポリマーディスパーションが耐アルカリガラス繊維メッシュの結合層や保護層となることが確認でき、これらを用いない繊維の観察ではアルカリによる明瞭な変状が確認できない。



(1) エポキシ樹脂

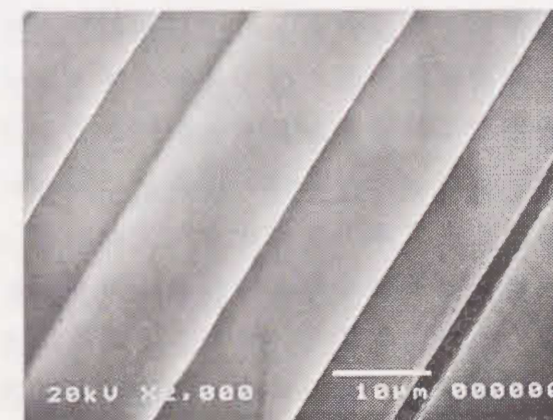


(2) ポリマーディスパーション原液

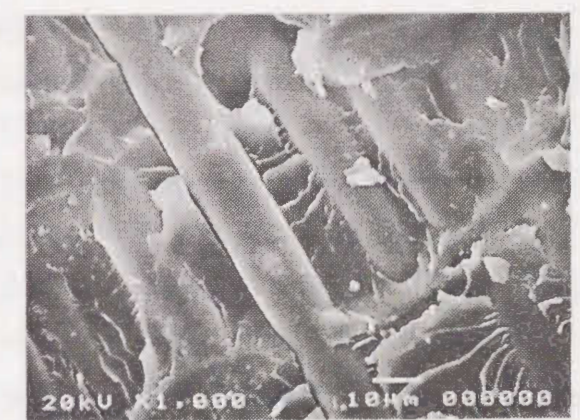


(3) ポリマーディスパーション希釈液

写真-4.8 各種結合材を用いたガラス繊維メッシュの走査電子顕微鏡観察像



(1) 結合材なし



(2) 樹脂結合材

写真-4.9 メッシュの走査電子顕微鏡観察像 (アルカリ水溶液浸漬1年)

4. 5 総括

永久埋設型枠製品用ポリマーセメントモルタルの補強材として利用する2次元格子状連続繊維メッシュに関する本検討結果を以下に要約する。

- ①連続繊維メッシュを使用したモルタル板やガラス繊維メッシュの引張試験では、酸やアルカリで粗面処理したアルミニウム板とエポキシ系接着剤とで供試体を補強することが有効となる。
- ②連続繊維メッシュは、モルタルの初期ひびわれ発生後の耐力保持にきわめて有効で、気密性の改善効果もあり、剛性の高いガラス繊維や炭素繊維では、引張強度、曲げ強度、ひびわれ抵抗性などを大きく向上させ、剛性の低いビニロン繊維では、伸び能力、耐衝撃性などを大きく改善させる。
- ③メッシュで補強したモルタル板の直接引張性状は、ひびわれ発生まで続くモルタルとメッシュとの一体化区間、ひびわれ多発区間およびメッシュだけで荷重を受けもつ区間の3領域が存在し、ガラス繊維メッシュやポリマーの使用で、付着弾性モデルの引張挙動に似たひびわれ多発区間での応力増加がみられる。
- ④モルタルに引張応力や曲げ応力が作用した場合の強度や靱性の改善には、補強用メッシュの糸を細くして間隔を狭めるのが有効であるが、メッシュの構成を決める場合には、補強効果に加えてモルタル板の成形性や付着性、必要によっては耐火性などを考慮する必要がある。
- ⑤ポリマーの使用は、モルタルのひびわれ発生強度、耐衝撃性、気密性、乾燥収縮などの品質改善にきわめて有効で、その効果はSBR系やEVA系よりもPAE系やSA系のディスパージョンの方が大きく、SA系では圧縮強度発現性も良好となる。
- ⑥モルタルの耐衝撃性改善には、連続繊維メッシュの使用がきわめて有効で、ポリマーの使用効果も大きく、これらを使用したモルタル板の埋設によってコンクリートの耐衝撃性も大幅に改善される。
- ⑦コンクリートと比べてモルタルの乾燥収縮率はかなり大きく、ひびわれなどの発生はないものの寸法精度などに考慮を要し、熱膨張係数も若干高いがメッシュ、ポリマー、フェロニッケルスラグ砂などの使用でこれらをかなり抑制できる。
- ⑧エポキシ樹脂系結合材を用いたガラス繊維メッシュやビニロン繊維メッシュは、アルカリ水溶液浸漬による引張耐力の低下がなく、アルカリ劣化を生じない。
- ⑨PAE系ポリマーディスパージョンによる簡便な浸漬乾燥処理は、アルカリ劣化を生じる耐アルカリガラス繊維メッシュの耐力保持に有効で、メッシュの結合力も高まり、イオン交換水などによるディスパージョンの希釈倍率や浸漬乾燥処理回数でメッシュに付着するポリマー量を自由に操作できる利点もある。
- ⑩樹脂やポリマーディスパージョンによるメッシュの結合状態の観察には走査電子顕微鏡観察が有効である。

第5章 永久型枠用モルタルの促進養生効果

5. 1 概説

前章までに、永久型枠用のモルタル板には、アクリル系水性ポリマーディスパージョン、とくに湿潤状態や早期材齢での強度発現性および圧縮強度の増進効果も期待できる造膜温度の高いSA系のもの、さらにエポキシ系樹脂やPAE系ポリマーディスパージョンといった有機高分子材料で耐アルカリ性や結合力を高めたEガラス繊維メッシュあるいは耐アルカリガラス繊維メッシュの利用によって、改質や補強を行う有効性が確かめられた。

しかし、ポリマーディスパージョンを混入するモルタルでは、ポリマー微粒子や分散剤がセメントの水和反応を阻害するだけでなく、メッシュを配する薄肉板の成形には単位水量の多い高流動モルタルとする必要があり、初期強度発現性に悪影響を及ぼすことなども明らかとなった。これは、標準的なPAE系、EVA系、SBR系などのセメント混和用ポリマーよりも強度発現性に優れたSA系ポリマーについても例外ではなく、成形時の温度が低い場合やポリマー結合材比を0.10よりも高めた場合などでは、材齢1日で脱型可能な強度に達しないことがある。また、ポリマー使用時には、セメントの水和によってモルタル組織がある程度強硬になってから乾燥養生に移し、ポリマー粒子の凝集や造膜によってモルタルを改質化させることが不可欠となるため、モルタル製永久埋設型枠製造時には、温度や湿度を長期間管理する必要がある。

ところで、整備された工場や建設現場に設置された仮設工場で、十分な品質管理のもとで継続的に生産されるコンクリート製品は、品質が高くて安定し、建設現場での機械化や工期短縮などにも役立つため、需要が増大している。一般のコンクリート製品工場では、成形後直ちには強度の出ない比較的大型の製品を大量に扱うため、単位水量を減らした硬練りコンクリートを振動、遠心力、加圧などで強力に締固め、蒸気養生などの促進養生で初期強度を高めて脱型し、型枠の回転率を高めるとともに、その後の湿潤養生との併用で出荷に要する品質を早期に確保し、生産性を高めるだけでなく養生や保管に要する用地問題にも対処している。

比較的小型の製品では、配合や成形、蒸気養生条件などに配慮して成形から脱型までのサイクルを1日2回としたり、超硬練りコンクリートを使用して振動締固め成形後直ちに脱型する即時脱型工法を採用することもある。筆者は、河野清

博士らとの共同研究で、コンクリート製品に関する材料、配合、練りまぜ、成形、養生などに関する研究実績を豊富に有している^{107~112)}。

永久埋設型枠は、工場製品が前提となるが、初期強度発現性の悪いモルタルで薄肉幅広板を作製する制約上、何らかの初期強度発現対策が必須となり、耐久性などの要求水準が高く、早期に品質を高める必要性もある。

そこで、本研究では、初期強度を増進させるために製品工場で標準的に使われている常圧蒸気養生と、ポリマーの凝集や造膜に必要となる湿潤養生後の乾燥養生を早める熱乾燥養生という加熱による2つの促進養生を採用し、ポリマーセメントモルタルの品質に及ぼす影響を調査することとした。また、早期強度発現に有効な早強ポルトランドセメントの使用効果についても、通常の普通ポルトランドセメントと比較検討するとともに、副産物の有効利用や天然砂の保護に加えて粒子が細くて強硬であるという点を踏まえて採用し、モルタルの流動性や強度の改善効果を確認できたフェロニッケルスラグ細粒砂の利用価値も評価の対象とした。

加熱による促進養生は、造膜温度が0℃～常温程度のポリマーに比べて50℃とかなり高いSA系ポリマーを意識するとともに、コンクリート用材料としては非常に高価なポリマーの使用量を抑えて最大の使用効果を得ることも採用理由の一部であるが、温度依存性の高いポリマーや熱膨張率の大きい水の割合が多い高流動モルタルに加えて、有機高分子材料で結合したガラス繊維メッシュに対する悪影響も懸念され、本章でこれらも検討することにした。

5. 2 蒸気養生の影響

(1) 序説

蒸気養生は、ボイラーで発生させた常圧の蒸気をピット式や棚式の養生室に通気し、型枠内のコンクリートを加温加湿することにより、強度の発現を早めるものである。コンクリート製品工場では、成形後できるだけ短時間でコンクリートの強度を脱型可能な値に到達させ、製造コストの10～20%を占めるといわれる型枠の回転率を上げ、また生産性や数量が比較的大きくて重い製品の保管スペースなどを考えに入れた早期出荷のため、一部ではオートクレーブ養生（高温高压蒸気養生）が行われるが、最も経済的といわれる常圧蒸気養生が促進養生として一般的に採用されている。この養生条件には、JISやACI指針で推奨値がある。

JIS製品における養生の規定は、品質に満足な結果が得られる方法とか品質に

悪影響を及ぼさない方法とかという曖昧な記載がされているにすぎないが、解説の中で、遠心力鉄筋コンクリート管では、練りまぜから蒸気養生開始までの前養生期間を2時間、温度上昇速度を20℃/h、最高温度を75℃としており、遠心力鉄筋コンクリートくいは、前養生期間や温度上昇速度は前記と同じで、最高温度を90℃とし、道路橋用PC橋げたやPC矢板では、前養生を3時間、温度上昇速度を15℃/h、最高温度を65℃としているなど、使用するコンクリートの品質や寸法などによって条件を変えている。

(2) 実験の概要

本実験では、ガラス繊維および鋼繊維補強コンクリートあるいは硬練りおよび即時脱型用超硬練りコンクリートに関する筆者らが行った過去の多数の研究成果をもとに、樹脂やポリマーで結合した連続繊維メッシュで補強する高流動ポリマーセメントモルタルという点を踏まえて、実験室用蒸気養生槽を用い、練りまぜから通気までの前養生（前置）期間を20℃で3時間、昇温期間を15℃/hで3時間、等温養生（最高温度保持）期間を65℃で3時間、降温（徐冷）期間を11時間とした条件で、各種材料を用いたポリマーセメントモルタルの諸強度発現性に及ぼす蒸気養生の影響を検討するとともに、早強ポルトランドセメントやフェロニッケルスラグ砂の使用効果についても調査した。

また、蒸気養生温度の影響を調査するために、最高温度を50℃、65℃および80℃とした蒸気養生も行った。

これらの検討で使用したモルタルの強度試験は、□40×40×160mm 角柱供試体を用いて行った（JIS R 5201）。なお、曲げ強度試験後の供試体の折片を使った割裂引張試験も行った。供試体数は各条件で3個以上とし、得られた測定値の平均値を試験結果とした。

(3) 実験の結果と考察

1) PAE系、EVA系およびSBR系ポリマーセメントモルタル

図-5. 1は、各種ポリマーセメントモルタルに、普通ポルトランドセメントと早強ポルトランドセメントを用いた場合の圧縮強度を示している。

試験で採用した3種のポリマーセメントモルタルは、ポリマー結合材比が0.10と比較的小さいにもかかわらず、常温では材齢1日で脱型できる状態まで硬化が進行していないために強度試験を材齢2日から開始した。この図より、SBR系、EVA系およびPAE系のポリマーセメントモルタルの圧縮強度発現は、ポリマーを使わずに水結合材比が同程度がそれよりも大きいプレーンモルタルに比べて非常

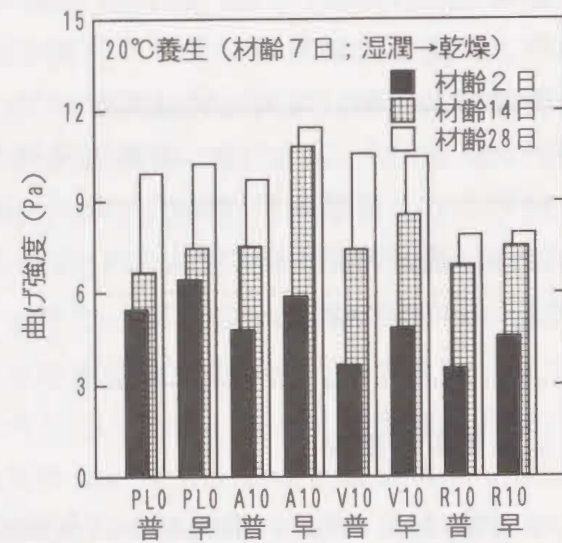
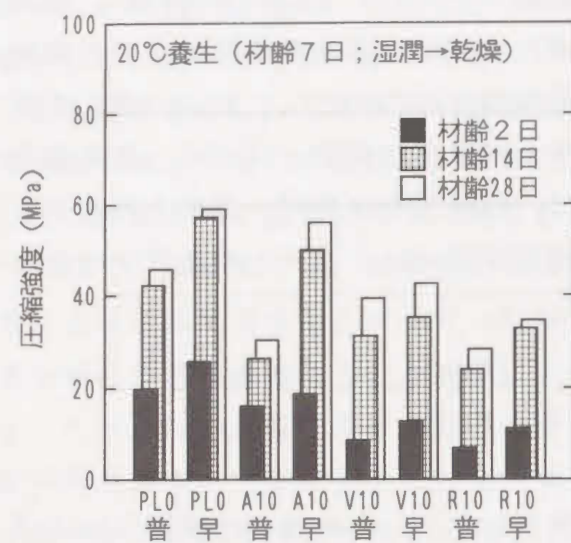


図-5. 1 圧縮強度(セメントの影響) 図-5. 2 曲げ強度(セメントの影響)

に悪く、とくに初期材齢での強度発現性にポリマーの使用が悪影響を及ぼすことがわかる。これらは、ポリマー粒子による凝集や造膜に湿潤養生が悪影響を及ぼすこと、ポリマー粒子がセメント粒子表面に付着して水和反応を阻害すること、ディスページョン中の分散剤がセメントの水和反応を遅延化させること、造膜温度が0℃以上であるこれらのポリマーが造膜つまり硬化の際に収縮を起こすこと、ポリマーの粒子やこれらが結合した膜(ポリマーフィルム)の弾性係数がセメント硬化体より低いことなどによるものと思われる。

しかし、ポリマーセメントモルタルに早強セメントを用いると、普通セメントの場合よりも強度が高くなっており、普通セメントを用いたプレーンモルタルと同程度の強度を得ることが可能となる。

一方、曲げ強度を示した図-5. 2より、PAE系やEVA系のモルタルは、材齢28日でプレーンモルタルより高い値を発揮しており、これらのポリマーがモルタルの曲げ強度改善に有効といえる。また、早強セメントによる強度増進効果も確認できる。しかし、材齢2日でも強度発現性は悪く、使用材料の変更や促進養生の導入などにより、初期強度発現を高めることが永久型砕製品では望まれる。

つぎに、これらのモルタルで行った蒸気養生(最高温度65℃)後の圧縮強度および曲げ強度を各々図-5. 3および図-5. 4に示す。これらより、蒸気養生が初期強度発現に非常に有効で、ポリマーセメントモルタルが脱型可能な強度を材齢1日でも十分得られることがわかる。また、常温養生の場合と同様に、ポリマーの使用でモルタルの圧縮強度は低下するが、SBR系を除けば曲げ強度は増進すること、強度発現性を高めるには早強セメントの使用が有効となることなども確認できる。

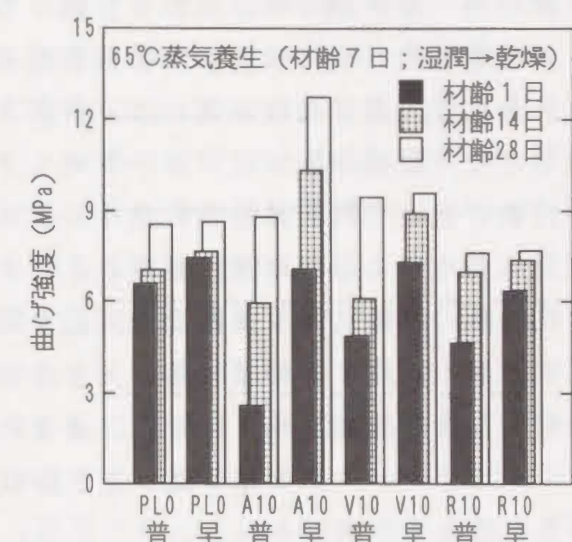
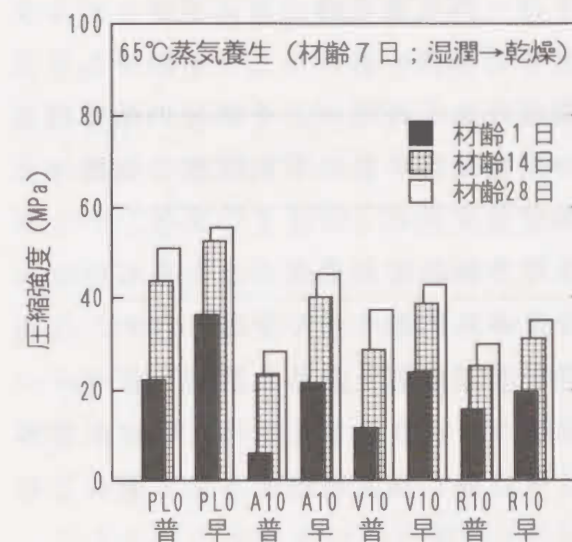


図-5. 3 圧縮強度(蒸気養生の影響) 図-5. 4 曲げ強度(蒸気養生の影響)

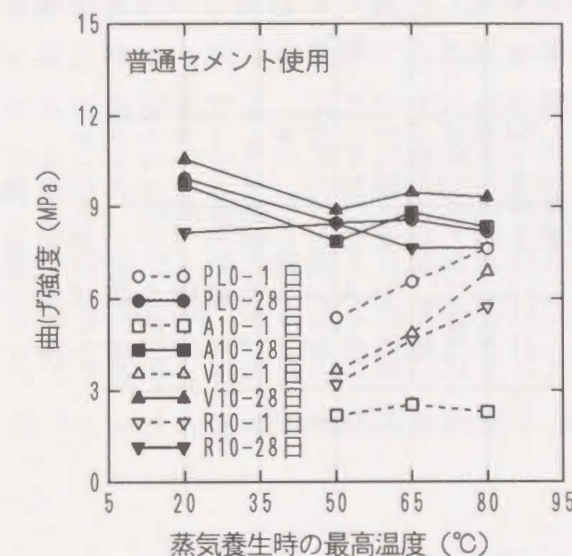
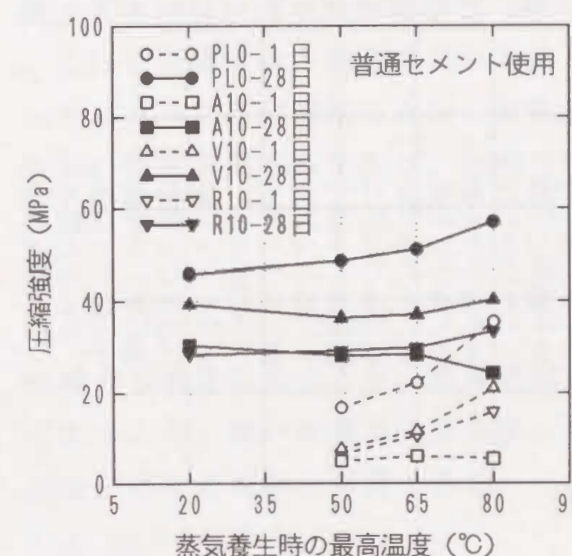


図-5. 5 圧縮強度(養生温度の影響) 図-5. 6 曲げ強度(養生温度の影響)

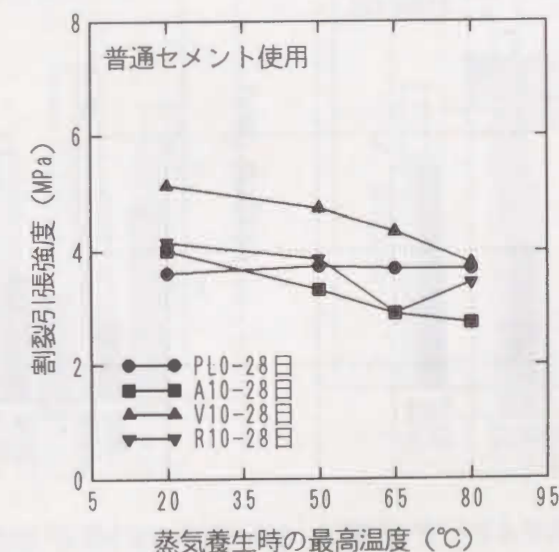


図-5. 7 割裂引張強度(養生温度の影響)

図-5.5, 図-5.6および図-5.7は, 蒸気養生時の最高温度とモルタルの圧縮強度, 曲げ強度および割裂引張強度との関係を各々示したものである。これらより, 養生温度が高いほど材齢1日強度は高くなるが, その後の強度増進は小さく, 材齢28日ではプレーンモルタルの圧縮強度を除いて同程度の強度となり, 曲げ強度では常温養生したモルタルの強度よりも劣ることがわかる。

蒸気養生による初期強度発現は, セメントの水和反応促進などによるもので, それ以降の材齢に伴う強度増進の低さは, モルタル内部の水や空気を含めた各種構成要素の熱による膨張収縮の大きさや違いなどが原因と思われるが, ポリマーを使用した高流動モルタルでは, 通常の製品用コンクリートと比べて単位水量が多く, ポリマーの熱伸縮も高いことが材齢1日以降の強度増進をさらに悪化させることになると思われる。

なお, 3種のポリマーの中でモルタル強度を高める効果の最も高いPAE系では, 蒸気養生した場合の材齢1日強度発現が悪いが, この原因については今のところ不明である。

2) SA系ポリマーセメントモルタル

前章までの検討で, モルタルの引張強度や曲げ強度だけでなく, 圧縮強度や湿潤養生時の強度なども改善できる効果を確認できたSA系ポリマーセメントモルタルについて, セメントの種類や蒸気養生の影響を調査するために行った実験より得られた圧縮強度および曲げ強度を各々図-5.8および図-5.9に示す。

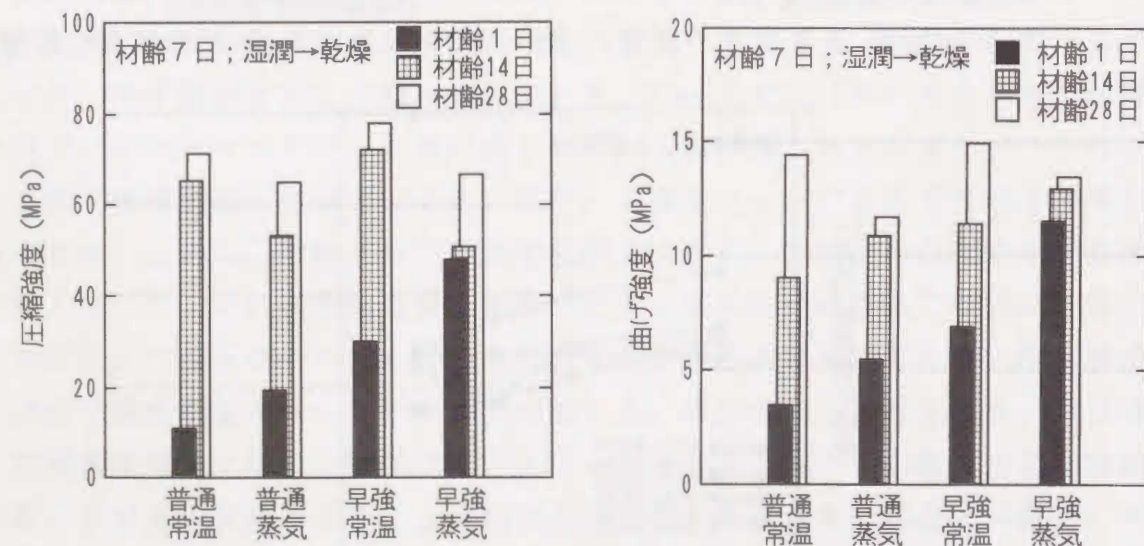


図-5.8 圧縮強度 (SA系ポリマーの影響) 図-5.9 曲げ強度 (SA系ポリマーの影響)

これらの図より, SA系ポリマーセメントモルタルでは初期強度発現が比較的良好で, 普通セメントを用いた常温養生でも脱型可能な強度が得られ, 早強セメントの使用で材齢1日~28日までの強度が高まることがわかる。また, 蒸気養生にも材齢1日強度発現性を高める効果があり, 両者の併用で初期材齢強度が一層増進するといえる。しかし, 蒸気養生では材齢1日以降の強度増進が小さく, 材齢28日ではいずれの強度も常温養生強度の方が高くなる傾向にある。

ここで, 早強セメントと蒸気養生とに関する使用効果を比較すると, 早強セメントの方が初期強度やその後の強度増進が大きく, 蒸気養生にも設備, 人手およびエネルギーが必要であり, 永久埋設型枠としての品質や製造コストなどを総合的に判断すると早強セメントのみの使用が適すると思われる。

つぎに, 早強セメントモルタルに砕砂 (記号; C) とフェロニッケルスラグ砂 (記号; S) を使用した場合の圧縮強度および曲げ強度を各々図-5.10および図-5.11に示す。

これらの図では, 砕砂の45%と比べて水結合材比を40%に低減できるフェロニッケルスラグ砂の使用により, 常温養生でも蒸気養生でも, またいずれの材齢でも高い強度が得られており, 今回の検討でもフェロニッケルスラグ砂がモルタルの強度発現に非常に有効であるといえる。また, 蒸気養生したモルタルの強度増進にフェロニッケルスラグ砂の使用が非常に有効で, 高い材齢1日強度が得られることがわかる。これは, フェロニッケルスラグ砂が, モルタルの水結合材比を低減する効果があること, 高温焼成によってできるために養生温度に対して安定であること, 鋭い角張りによる高い付着力がモルタル組織の熱膨張を拘束することなどによるものと推測できる。

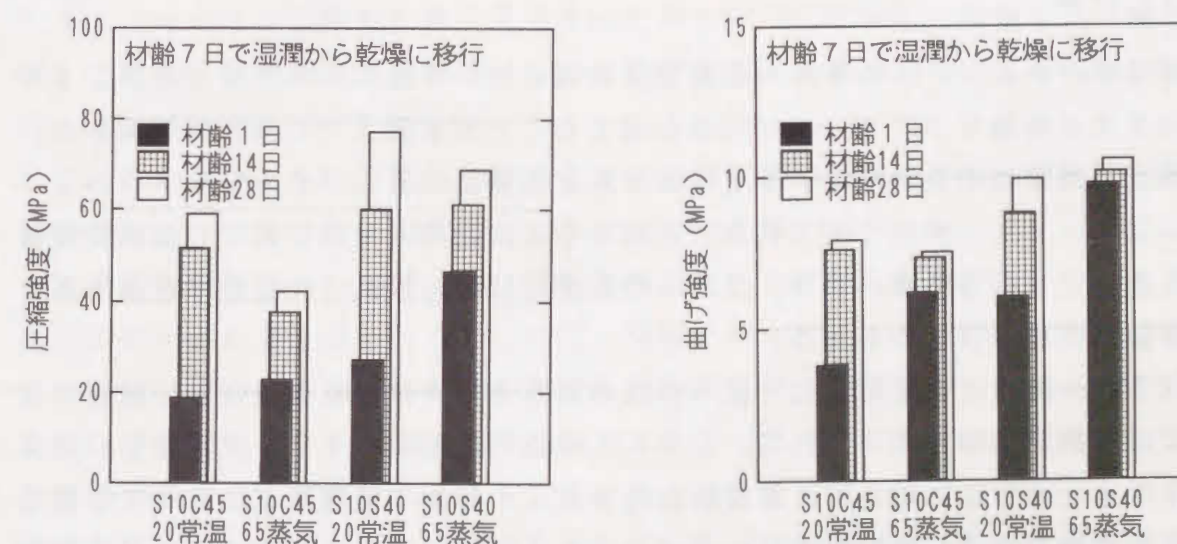


図-5.10 圧縮強度 (骨材の影響) 図-5.11 曲げ強度 (骨材の影響)

(4) まとめ

永久埋設型枠製品の製造で行う蒸気養生に関する本検討結果を以下に要約する。

- ① SBR系, EVA系およびPAE系のポリマーセメントモルタルの初期強度発現は非常に悪く, 早強ポルトランドセメントを用いた場合でも, 材齢1日で脱型可能な強度を得にくく, 初期強度を高めるには蒸気養生と早強セメントとの併用が有効となる。
- ② SA系のポリマーセメントモルタルの初期強度発現性は良好で, 材齢1日でも脱型可能となるが, 蒸気養生や早強ポルトランドセメントの採用で初期強度発現性がさらに高まる。
- ③ 蒸気養生はポリマーセメントモルタルの初期強度発現に非常に有効であるが, 材齢1日以降の強度増進効果が小さいため, 高品質化が要求される永久埋設型枠製品では, 初期強度発現に有効でその後の強度増進も高い早強ポルトランドセメントの使用が適する。
- ④ 水結合材比を低減できるフェロニッケルスラグ砂の使用は, 養生方法やセメントの種類に関係なくポリマーセメントモルタルの初期強度発現やその後の強度増進に有効で, とくに蒸気養生時の初期材齢強度を高める効果が大きい。

5. 3 熱乾燥養生の影響

(1) 序説

ポリマーセメントモルタルの初期強度発現には, 早強ポルトランドセメントや蒸気養生が有効でポリマーにはSA系が適することが前節までの検討で判明した。しかし, 通常のポリマーセメントモルタルと同様にSA系のポリマーセメントモルタルについても, 強度や耐久性などを高めるには初期・早期材齢での湿潤養生後に乾燥養生を行う必要があり, これらの促進化により製品の生産効率を高めることが製品工場では求められる。

ポリマー使用によるち密化で遮へい性の高まるモルタルを大量に早く乾燥させるには加熱が有効と考えられる。しかし, 理論的な解明も十分とはいえないセメントと水との反応に加えて, 温度依存性が高く, 凝集や造膜などによって形態を変える有機高分子が絡むポリマーセメントモルタルに, 同じく有機高分子で結合したガラス繊維メッシュを積層するという複雑な複合体に, 熱乾燥養生を採用した調査報告は内外を問わず皆無である。加えて, 最低造膜温度が50℃と通常のセ

メント混和用ポリマーに比べて高い特殊なSA系ポリマーを使用したモルタルでは, 加熱による乾燥養生が及ぼす影響を理論的に究明することは困難であり, ここでも本研究の主体となっている実験により, 熱乾燥養生がポリマーセメントモルタルの強度や耐久性などに及ぼす検討を行うこととした。また, 補強用メッシュについても加熱による影響を調査するため, 熱処理した場合の強度や耐アルカリ性に関する試験を行った。

(2) 実験の概要

実験では, 材齢7日まで20℃湿潤養生したモルタル供試体を20℃乾燥養生(60% R.H.)に移し, 材齢14日で電気乾燥炉による熱乾燥養生を行った。その条件は, 昇温期間が1時間, 最高温度を保持する等温期間が60℃, 80℃, 100℃, 120℃および160℃で1時間または3時間(3時間を標準とする), および降温(徐冷)期間が1時間である。

モルタルの品質試験は, □40×40×160mm角柱供試体およびφ50×100mm円柱供試体による圧縮強度試験, 曲げ強度試験, 割裂引張強度試験および静弾性係数試験, φ150×50mm円柱供試体での歯車状ドレッシングホイールの回転による摩耗試験, φ50×100mm円柱供試体での湿潤凍結融解試験, φ50×100mm円柱供試体でのNaCl飽和水溶液浸漬による塩分浸透試験, φ50×100mm円柱供試体での10%硫酸マグネシウム水溶液や2%塩酸水溶液浸漬による耐薬品試験, メッシュを配した10×50×400mm供試体での直接引張試験, メッシュを配したφ100×20mm円板供試体での鋼球落下衝撃試験, メッシュを配したφ100×20mm円板供試体での鉄筋腐食に影響する酸素ガス(圧力; 0.3MPa)を用いた透気試験などである。

また, モルタルと同様に最高温度を80℃および120℃として加熱した(等温期間; 3時間)補強用ガラス繊維メッシュのアルカリ水溶液浸漬による引張試験も行った。

これらの試験方法は, 新しく加えた凍結融解試験や簡便なものに変更した衝撃試験を除き, これまでに記載したものと同じである。

凍結融解試験については, 永久型枠自体とこれを埋設したコンクリートとの双方での検討が必要と思われる。しかし, 型枠とコンクリートとの複合体では耐久性の評価に使われる動弾性係数の測定に問題があり, 装置面での不備も重なり, 今回は型枠用モルタルについてのみの調査を行った。この際, 埋設型枠としての板厚や乾燥養生を要することを考えると, 土木学会基準の「コンクリートの凍結融解試験法」(JSCE-G501)に定められている□100×100×400mm角柱供試体は寸法的に問題があり, またメッシュの積層が動弾性係数の測定値に及ぼす影響なども考慮して供試体をモルタルのみの小型円柱とした。試験に際しては, 恒温恒

湿装置を用い、ポリエチレン袋に供試体と水を入れて湿潤下で凍結融解を繰返し、質量や共鳴縦振動による動弾性係数（JIS A 1127）を測定した。凍結融解の条件は、恒温恒湿装置の槽内で、最高温度の30℃を35分間保った後に60分間で30℃から-30℃に冷却し、最低温度の-30℃を35分間保った後に再び30℃まで60分間で加熱する1サイクル 190分とした。温度条件は、供試体を覆う水が完全に凍結融解する条件を予備実験より求めたため、供試体中心部温度を5～-18℃、試験槽内冷媒温度+20～-25℃としているJSCE-G501の規定よりは温度範囲が広がった。

衝撃試験は、内径 120mmの容器内に詰めた50mm厚の豊浦標準砂上に静置した供試体上方 500mmの高さから540gステンレス鋼球を円筒容器を介して自由落下させ、初期ひびわれ発生と破壊にいたるまでの落下回数を測定した。

以上では、供試体数を静弾性係数試験の2個を除いて各条件3個以上とし、試験結果は測定値の平均値とした。

(3) 実験の結果と考察

1) 強度

図-5.12は、材齢7日以降常温（20℃）乾燥養生を行ったモルタルを材齢14日で電気炉を用いて強制的に熱乾燥養生した場合の熱乾燥前後での相対質量を示したものである。また、このモルタルより得られた圧縮強度および曲げ強度を各々図-5.13および図-5.14に示す。

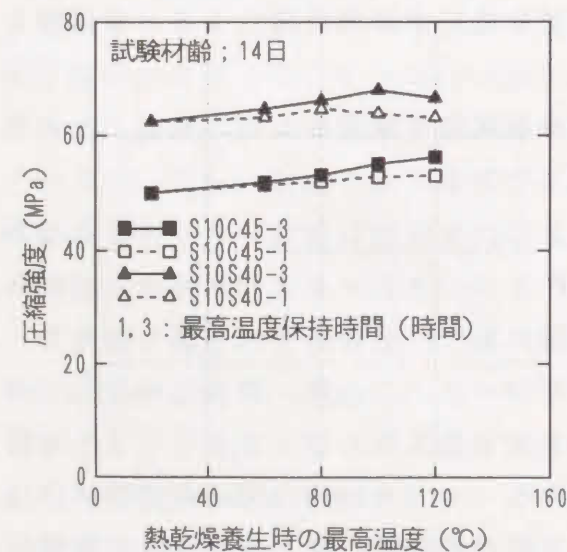


図-5.13 圧縮強度（熱乾燥の影響）

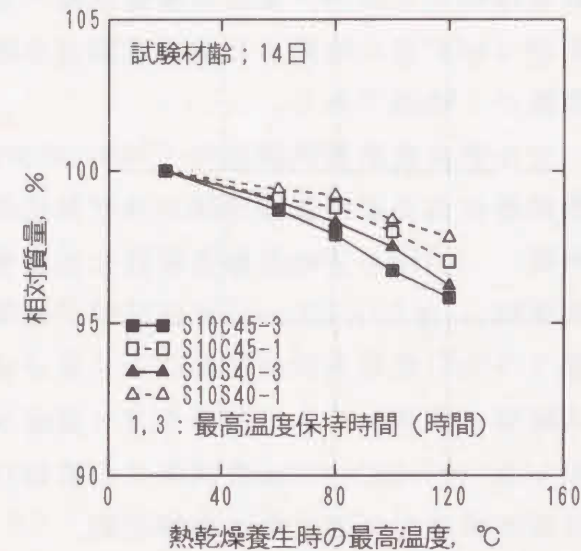


図-5.12 熱乾燥後の相対質量

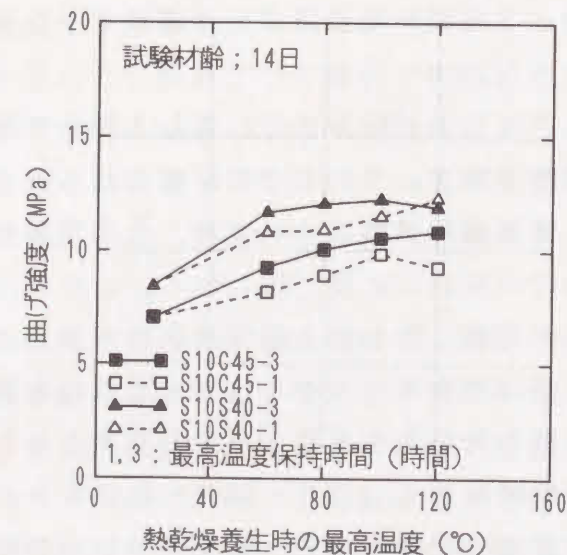


図-5.14 曲げ強度（熱乾燥の影響）

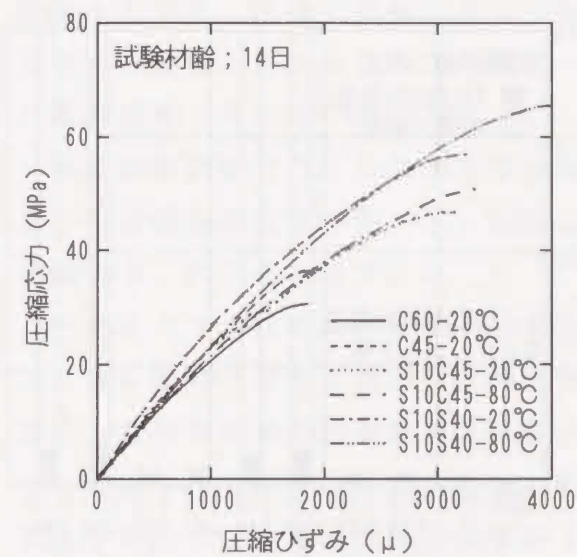


図-5.15 圧縮応力-ひずみ関係

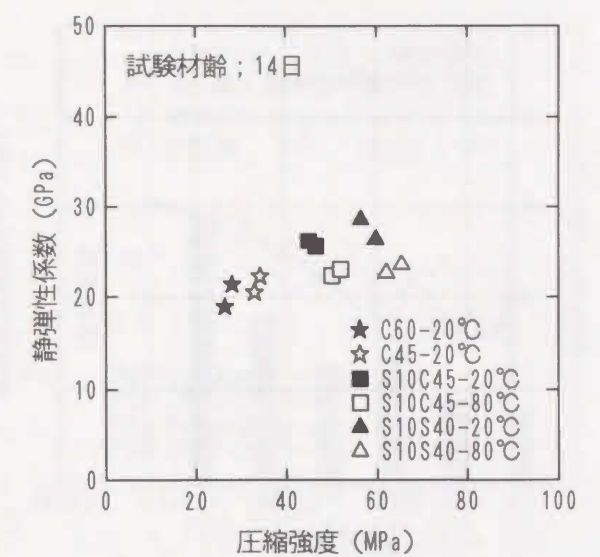


図-5.16 圧縮強度と静弾性係数

これらより、加熱により強制的に炉乾燥させる熱乾燥養生は、SA系ポリマーセメントモルタル内部の水分を蒸発させるので質量が減少し、最高温度が100℃程度で頭打ちの傾向を示すが圧縮強度や曲げ強度を増進させる効果のあることがわかる。これは、最低造膜温度が50℃のSA系ポリマー粒子が水分の移動で凝集して加熱によって造膜化することによるためと思われる。これは、圧縮強度よりも曲げ強度の増進効果が高いことからもある程度推測できる。

図-5.15および図-5.16は、円柱供試体より得られた圧縮応力-ひずみ関係および静弾性係数と圧縮強度との関係を示したものである。なお、モルタルではφ50×100mm円柱、コンクリートではφ100×200mm円柱を使用し、静弾性係数は3分の1割線係数としている。

これらより、コンクリートと比べてモルタルの圧縮強度や最大応力時のひずみが高く、圧縮靱性改善にSA系ポリマーの使用が有効といえる。また、コンクリートと比べてモルタルは弾性係数も高いが、強度を同程度と仮定すればモルタルの弾性係数は相対的に小さいといえる。モルタルの弾性係数が比較用AEコンクリートに比べて高いのは、圧縮強度自体に差があり、空気量も1%以下に抑えたことなどによるとと思われる。

熱乾燥養生を行ったモルタルでは、圧縮強度がいくらか上昇するが、水分の蒸発によるためか、弾性係数は多少低下する傾向が見られる。

図-5.17は、ガラス繊維メッシュを2枚配したモルタル板より得られた引張応力-ひずみ関係を示している。

この図からも、熱乾燥養生による引張応力の高い増進効果がみられるが、これも上述したようなポリマーの造膜効果といえる。なお、この図では、メッシュに

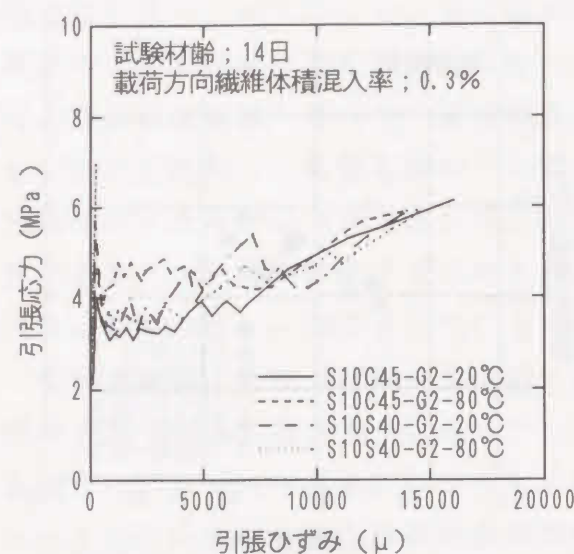
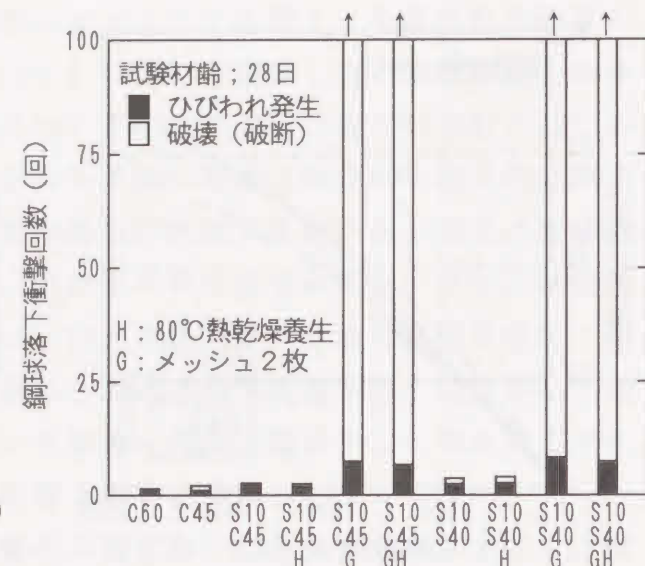


図-5.17 引張応力-ひずみ関係



圖—5. 18 耐衝擊性

よる初期ひびわれ後の靱性改善効果は大きい、終局強度の増進効果はあまりみられない。これは、モルタルの引張強度が高いこと、補強用ガラス繊維の体積混入率が非常に小さいことなどによるものといえる。

耐久性が要求される永久埋設型枠では、終局耐力と同時にひびわれの発生を抑えることが重要となるため、モルタルの引張強度の増進やひびわれ幅の抑制効果の高いメッシュをより多く使用すると有利ではあるが、ガラス繊維は安価とはいえコンクリート材料としては高価であり、それを利用する際には使用材料や養生方法によって変動するモルタルマトリックスの強度を十分把握しておくことが大切といえる。

つぎに、熱乾燥養生やガラス繊維メッシュの有無、骨材の種類などを要因とした衝撃試験で得られたモルタル板の耐衝撃性を図-5.18に示す。

これより、コンクリートと比べてモルタルの耐衝撃性は、前章でも述べたようにポリマーの使用で向上し、フェロニッケルスラグ砂の利用でも改善する傾向がみられるが、耐衝撃性を高める最大の効果はメッシュの積層にあることがわかる。このように、永久埋設型枠用モルタル板で重要となる靱性や耐衝撃性の増進には、メッシュの使用が不可欠である。

2) 耐久性

図-5. 19は、摩耗試験で得られた摩耗減量を示したものである。

この図より、第3章での結果と同様に、コンクリートと比べてSA系ポリマーセメントモルタルの耐摩耗性が大きいこと、フェロニッケルスラグ砂の使用でモルタルの耐摩耗性が高まることなどがわかる。しかし、最高温度を80℃とした熱乾

乾燥養生の影響は明確に把握できず、20℃で常温養生したモルタルと同程度の摩耗減量となっている。

凍結融解試験で得られた相対質量および相対動弾性係数を図-5.20および図-5.21に各々示す。

これらより、比較用AEコンクリートは、凍結融解サイクル数が300回まで安定した相対質量や相対動弾性係数を示しており、AE剤による連行空気の有効性がわかる。また、目標空気量を1%以下に抑えたSA系モルタルでも多少相対動弾性係数が低下するものの、質量的には安定な状態を保つといえる。しかし、熱乾燥養生したモルタルでは100回程度のサイクル数から急激に相対質量や相対動弾性係数が低下し、耐凍害性が劣ることがわかる。

この原因については、熱伸縮の大きいポリマーが加熱で造膜化して連続体となり、超微粒子として分散しているよりも $-30 \sim +30^{\circ}\text{C}$ という厳しい温度条件による影響を受けること、ポリマーが結合する際にレジンコンクリートや通常の接着材でもみられるような硬化収縮を生じること、モルタルがち密で表面積の少ない円柱供試体のため、材齢14日での炉乾燥によって内部にある多くの水分が熱膨張や気化をを起こしてモルタル組織に損傷を与えること、塩分浸透試験や耐薬品試験についてもいえることだが、乾燥養生が十分進行しない段階で水溶液（この場合は水）中に浸漬するため、試験中にコンクリートでは水和が進行するが、ポリマーセメントモルタルではポリマーによる

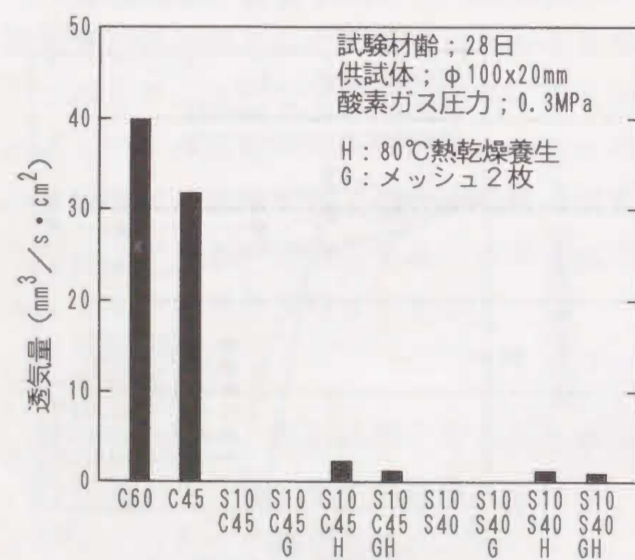
凝集や造膜の効果が発揮できないことなどが考えられるが、これらの検証は今後の課題といえる。

炉乾燥させた試料を観察すると、表面にマイクロクラックの発生しているものがあり、これについては、ポリマー粒子の凝集や造膜あるいは水分の供給によるセメントの水和によって癒着する可能性も高いと思われるが、ポリマーセメントモルタルを加熱によって強制乾燥させる場合にはその温度管理に十分な注意が必要で、現状では耐久性を要する場合には熱乾燥養生を採用しないことが望まれる。

しかし、熱処理の有無にかかわらずポリマーセメントモルタルでは耐凍害性に問題があるので、試験開始材齢や温度などの凍結融解試験方法の見直しも含めて、蒸気養生、水密性・気密性、諸強度などには多少悪影響が考えられるが、消泡剤の種類や使用量などを変えて目標空気量をもう少し高く設定したり、ポリマーの使用自体は耐凍害性を改善する効果があるので、コストや初期材齢での品質には不利となるが、ポリマー結合材比をもう少し大きくするなどの検討が必要かと思われる。

図-5.22は、透気試験で得られた透気量を示している。

この図から、コンクリートと比べてモルタルでは透気量が非常に少なく、気密性改善にSA系ポリマーの使用が非常に有効といえる。これは、モルタルの空気量を1%以下に設定した配合や使用した骨材やセメントの違いなども影響するが、ポリマー粒子の充てん、凝集および造膜効果によるといえる。モルタルでは、常温よりも熱乾燥養生の方が透気量が大きいが、これは凍結融解に関する検討結果でも触れた熱乾燥による悪影響が原因と考えられる。しかし、常温養生のSA系ポリマーセメントモルタルでは、組織がポリマーによって密化されることに加え



图—5.22 透氣量

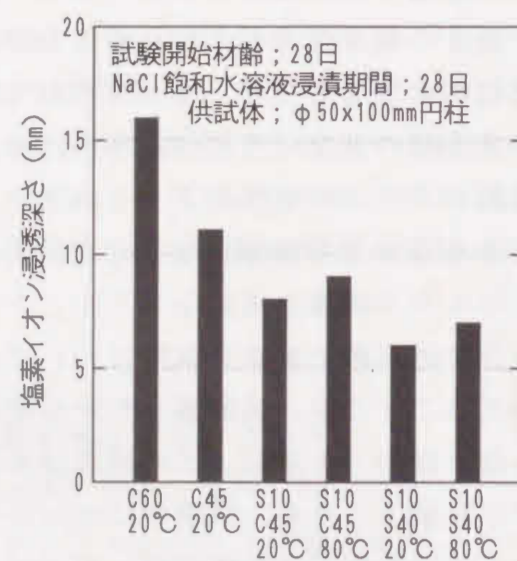


図 5. 23 塩素イオン浸透深さ

て、造膜温度の関係上加熱による強制乾燥ができないことも大きく影響しているとも考えられる。なお、熱乾燥養生モルタルについては、第3章と同様に透気性が最も影響する促進炭酸化試験を継続中であり、結果は別途発表する予定である。

図-5.23は、塩分浸透試験で得られた塩素イオン浸透深さを示している。

この図から、第3章の結果と同様に、コンクリートと比べてSA系ポリマーセメントモルタルの遮塩性が高いこと、フェロニッケルスラグ砂の使用でモルタルの遮塩性が高まることなどがわかる。また、常温養生に比べると熱乾燥養生したモルタルの塩素イオン浸透深さは若干大きいともいえるが、両者の差は1～2 mm程度であり明確には良否を判定できない。

なお、早強セメントは普通セメントや混合セメントに比べて遊離する塩素イオンの存在割合が高いことが指摘されており^{11,3)}、モルタル板を埋設したコンクリート供試体の塩水浸漬試験は現在も進行中であり、浸透深さに加えて塩素イオン量の測定を行う予定であり、その結果は別途発表する。

図-5.24および図-5.25は、各々硫酸マグネシウム10%水溶液および塩酸2%水溶液に浸漬した供試体の質量変化を示している。

硫酸マグネシウムの場合、コンクリートは浸漬後数週間で質量が増加し、その後減少に転じており反応性が高いといえる。しかし、セメント量の多いモルタルではコンクリートに比べて質量増加の進行が緩慢であり、モルタルの耐硫酸塩性の改善にSA系ポリマーの使用が非常に有効といえる。一方、塩酸の場合、モルタルとコンクリートに顕著な差がなく、SA系ポリマー使用の改善効果がみられない。

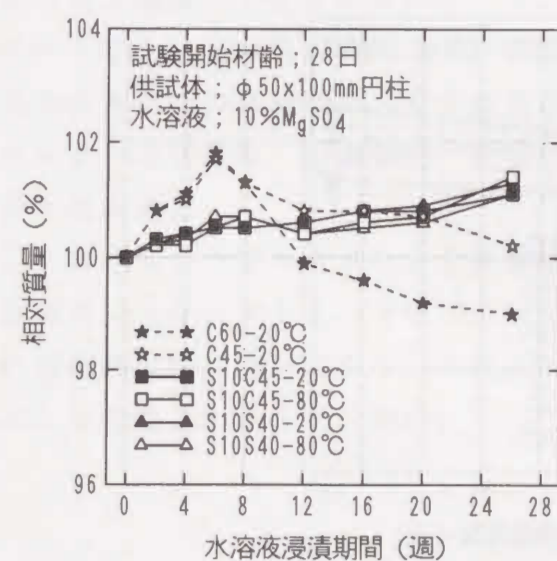


图-5.24 耐藥品性 (硫酸塩)

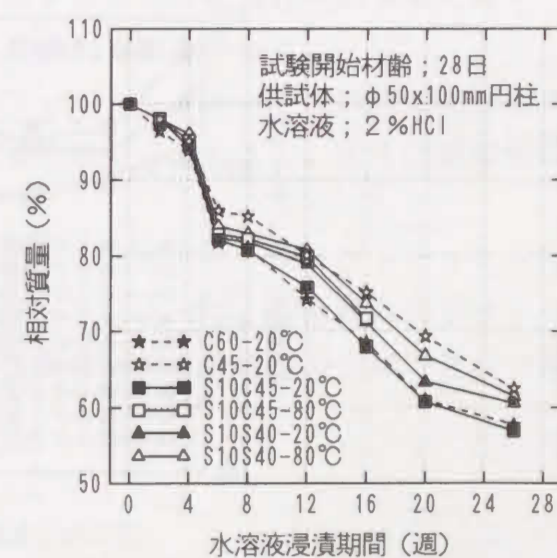


图-5.25 耐薬品性 (塩酸)

これらは、SA系ポリマーをポリマー結合材比で0.10程度（セメントに対して10%強）使用しても塩分浸透試験結果からもわかるようにイオンの浸透を完全には遮へいできないこと、モルタルのセメント量がコンクリートと比べて非常に多いこと、靱性や引張強度の高いポリマーセメントモルタルは、硫酸塩とセメント水和物とによって生成する結晶質エトリンガイトの膨張圧には対応できるが、塩酸とセメント水和生成物の水酸化カルシウムとの反応でできる可溶性物質の溶出には抵抗しにくいということなどが関係すると思われる。

なお、コンクリートでは、水結合材比（水セメント比）が60%よりも45%の方が若干耐薬品性に優れているが、水結合材比が40～45%で大差のないモルタルでは、使用した骨材の種類、熱乾燥養生の有無などが耐薬品性に及ぼす影響はあまりないといえる。

図-5.26は、PAE系ポリマーディスパージョンで浸漬乾燥処理を2回行った耐アルカリガラス繊維メッシュにおける引張耐力の経時変化を示したものである。

本章の実験では、直接引張試験を除くとモルタルにメッシュを使用していないが、メッシュにもポリマーを結合材として使っており、蒸気養生や熱乾燥養生を採用する場合、加熱がメッシュの性状に及ぼす影響を調査する必要がある。

この図より、第4章でも結論としたが、ポリマーで処理したメッシュは、アルカリ水溶液浸漬後数週間は多少の耐力低下を示すがその後は比較的安定な状態を保っており、アルカリ劣化の抑制にポリマーディスパージョンによる簡便な結合処理が有効といえる。また、ディスパージョンを希釈した場合にも良好な耐アルカリ性を示しており、メッシュの結合力からいえば付着量の多い原液が有利だが、コスト的には希釈液の利用も検討に値するといえる。

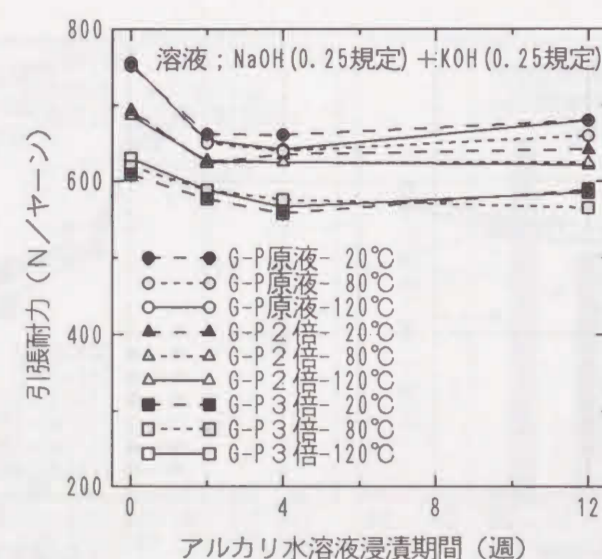


図-5.26 熱処理したポリマー処理ガラス繊維メッシュの引張耐力

また、メッシュの引張耐力や耐アルカリ性に及ぼす加熱の影響は、80℃～120℃程度ではないものと判断できる。なお、メッシュの外観は、120℃加熱で多少変色した程度で顕著な変状はみられなかった。

(4) まとめ

永久埋設型砕製品の製造で行う熱乾燥養生に関する本検討結果を以下に要約する。

①熱乾燥養生を行ったSA系ポリマーセメントモルタルでは、水分の蒸発とともに質量の減少や弾性係数の低下を示し、最高温度が100℃程度で頭打ちとはなるが圧縮強度、曲げ強度および引張強度が増進し、最低造膜温度の高いポリマー粒子も造膜化するため、とくに曲げ強度や引張強度の改善効果が高く、靱性も向上する。

②熱乾燥養生は、SA系ポリマーセメントモルタルの凍結融解抵抗性を悪化させ、気密性や遮塩性なども若干低下させる。

③耐アルカリガラス繊維メッシュに常温造膜形のPAE系水性ポリマーディスパージョンで浸漬乾燥処理を施すと、繊維に付着するポリマー量に応じて引張耐力が増加し、アルカリ浸漬後数週間で若干引張耐力の低下を示すがその後は安定した耐アルカリ性を保ち、120℃程度の加熱による引張耐力や耐アルカリ性への悪影響はない。

④SA系ポリマーを使用したモルタルは、コンクリートに比べて、耐衝撃性、耐摩耗性、気密性、遮塩性などが非常に優れており、泡消剤の使用で空気泡の連行を抑えているにもかかわらず耐凍害性も比較的良好である。

⑤ガラス繊維メッシュの使用により、モルタルの引張抵抗性や耐衝撃性はコンクリートに比べて非常に高くなり、気密性改善にも効果がある。

⑥水結合材比の低減効果を有する強硬なフェロニッケルスラグ砂の使用により、モルタルの諸強度、耐衝撃性、遮塩性、気密性などが向上し、とくに耐摩耗性は非常に高まる。

⑦早強ポルトランドセメントを多量使用しているポリマーセメントモルタルは、普通ポルトランドセメント使用のコンクリートに比べて、耐酸性は同程度となるが耐硫酸塩性が優れており、これらの耐薬品性は熱乾燥養生の有無や骨材の種類による影響をあまり受けない。

5. 4 総括

永久埋設型枠製品用ポリマーセメントモルタルで問題となる初期強度の増進，高価なポリマーの有効利用，養生期間短縮などを目的として採用した蒸気養生と熱乾燥養生に関する本検討結果を以下に要約する。

①成形直後に行う最高温度65℃程度の蒸気養生は，ポリマーセメントモルタルの材齢1日程度の初期強度発現に有効だが，その後の強度増進はあまり期待できないので高品質が要求されるモルタルには適さない。

②初期湿潤養生後に行う乾燥養生を促進させる最高温度100℃程度の熱乾燥養生は，ポリマーセメントモルタルの圧縮強度，曲げ強度および引張強度の増進に有効だが，凍結融解抵抗性などの耐久性を損なう恐れがあるので高耐久性を要するモルタルには適さない。

③早強ポルトランドセメントの使用は，初期および早期材齢でのポリマーセメントモルタルの強度発現性に非常に有効となる。

④SA系ポリマーディスパージョンを使用したモルタルは，初期および早期材齢での強度発現が良好で，コンクリートと比較して，凍結融解抵抗性や耐酸性などは同程度となるが耐衝撃性，耐摩耗性，気密性，遮塩性，耐硫酸塩性などが非常に優れている。

⑤ポリマーセメントモルタルでは，ガラス繊維メッシュの使用で，引張や衝撃に対する抵抗性が大きく改善し，フェロニッケルスラグ砂の使用で，圧縮強度，曲げ強度，引張強度，耐衝撃性，耐摩耗性，遮塩性などが向上する。

⑥耐アルカリガラス繊維メッシュを常温造膜形のPAE系水性ポリマーディスパージョンで浸漬乾燥処理を施すと，繊維に付着するポリマー量に応じて引張耐力が増加し，アルカリ浸漬後数週間で若干引張耐力の低下を示すがその後は安定した耐アルカリ性を保ち，120℃程度までの加熱による引張耐力や耐アルカリ性への悪影響はない。

第6章 モルタル型枠と現場打ち コンクリートとの一体性

6. 1 概説

前章までの検討より，永久埋設型枠と現場打ちコンクリートとの接合性に影響を及ぼす型枠用モルタル板の応力－ひずみ関係，乾燥収縮，熱伸縮などについては，両者の接合性を大きく阻害する要因とはならないことを掌握した。

しかし，モルタル型枠と現場打ちコンクリートとを一体化させた複合体に関する実験は，耐衝撃性などの一部の試験に留まっており，最も大切となる両者の接合面に直接応力を作用させた場合の力学的挙動や，接合性を確保するためのモルタル型枠側の接合面処理の方法について，本章で検討することとした。なお，複合化された構造部材としては，実構造部材を想定した複合応力や繰返し応力による接合性の評価も重要であり，その検証については鉄筋コンクリートはりの載荷試験を行う次章で行うこととした。

プレキャスト型枠工法であるPC合成床版工法では¹¹⁴⁾，現場打ちコンクリートの打設面に生じるせん断応力に抵抗させるため，PC鋼材方向に40～50mm間隔で4mm程度の段差を有する凹凸あるいは菱形などの別の形状の凹凸をPC板上面に設ける必要がある。また，PC板を支持する側のコンクリート桁では鉄筋，鋼桁ではスタッドなどでずれ止めを施し，鋼桁ではジョイントフィラーや無収縮モルタルも利用され，PC板に埋設される吊り金具も接合性を高めるのに有効となる。

2種の要素を複合化させた代表的な構造形式である鋼コンクリート合成構造でも¹¹⁵⁾，鋼とコンクリートとの一体性が前提となるだけに，両者の接合性を考慮した設計・施工が行われる。この構造では，せん断力の伝達や鋼板の座屈防止などのために，スタッドジベルや形鋼などの鋼材を鋼板に溶接したり，ダイヤフラムや突起付き鋼板などが使用される。高流動コンクリートの利用や沈埋函への適用などで，近年注目されている鋼コンクリートサンドイッチ工法では，鋼板とコンクリートとの一体性を保つために形鋼などによるシアコネクタを適当な間隔で鋼板に配する。

プレキャスト部材の継目では，モルタルや接着材の使用，ガイドの役目もする接合キーと呼ばれる突起の設置，PC鋼材による圧着などが行われる。

通常のコンクリートでも，設計や施工の制約から，コンクリート同士を接合しなければならないことが多く，そのために継目の処理が行われる。この場合，せ

ん断力の大きい断面を避けたり、旧コンクリートにおける硬化前の高圧の水や空気による薄層除去、超遅延形打継目処理剤の利用、硬化後のサンドブラストやワイヤブラシがけ、新コンクリート打設前の密実で入念なモルタル敷設、あるいは打継ぎ面となる型枠への金網の利用による粗面処理などが行われる。

以上は、鋼とコンクリートあるいはコンクリート同士の一体性が前提となる構造物における接合法であり、永久埋設型枠は、現在のところ構造的有効断面化を主たる目的とはしていないが、耐久性や美観の向上にも一体性は重要であり、かつて建築物からタイルなどの化粧仕上げ材の落下が社会問題化したことがあったように、型枠の剥落による第三者影響度は高く、構造的有効断面としての用途も将来可能性があり、モルタル製永久埋設型枠と現場打ちコンクリートとの一体性は重要な検討課題である。

本研究では、建設現場でのコンクリート打設前に、薄肉モルタル製永久型枠板の接合面に様々な処理を施すのは困難であることから、永久型枠成形時にコンクリートと接する型枠裏面に突起を設けることとし、平打ち成形法の場合、メッシュを配した型枠内に流し込んだモルタルがプラスチックな状態を保つ間に砕砂や砕石を散布し、メッシュで沈下を抑えながら自重で埋め込ませる方法、さらに縦打ち成形法の場合は、モルタル板用の型枠に溝状や千鳥状の凹凸をあらかじめ付けておき、その形状をモルタル板に転写する方法を採用した。

実験では、これらの突起を設けたモルタル板を埋設板としてコンクリートを打設し、作製した複合体の接合面にせん断応力や垂直引張応力を作用させて、付着性に及ぼす接合面形状の影響を調査することにした。なお、砕砂砕石散布では、使用する砕砂・砕石の粒径や散布量を要因とし、突起高さを10mmで一定とした形状転写では、突起の形状（連続溝状および独立千鳥状）、剥離に影響すると思われる突起の断面形状（長方形、台形、逆台形および平行四辺形）および千鳥状における突起の寸法（30×30mm、45×45mmおよび60×60mm）と数とによる突起面積（突起付け根部の全断面積）を要因とした。

実験で採用したモルタル埋設板の形状と2種の試験で得られた各強度を表-6.1に、また転写法によるモルタル埋設板側の接合面形状を図-6.1に各々示す。

6.2 せん断応力下での接合性

(1) 序説

モルタル製の永久埋設型枠は、構造物表層に配されるため、応力-ひずみ関係、

表-6.1 モルタル型枠の種類と試験結果

番号	接合面の分類	突起の断面形状	突起寸法 (mm)	突起数量	突起付け根部面積 (cm ²)	2面せん断強度 (MPa)	割裂引張強度 (MPa)
1	板なし	コンクリートのみ	—	—	—	5.35	3.00
2	無処理	突起なし	—	—	0	0.10	0.16
3	砕砂砕石散布	砕砂	2.5~5	0.8kg/m ²	—	2.05	—
4		砕石	5~10	2.0kg/m ²	—	—	0.80
5		砕石	5~10	3.0kg/m ²	—	1.66	—
6		砕石	5~10	4.0kg/m ²	—	—	1.33
7		砕石	10~15	4.0kg/m ²	—	—	0.96
8		砕石	10~15	6.0kg/m ²	—	2.36	—
9		砕石	10~15	8.0kg/m ²	—	—	1.80
10	10mm高	長方形（載荷平行）	45×145	2個	130	1.57	1.41
11	長方形	長方形（載荷直角）	45×145	2個	130	2.13	1.17
12	連続突起	台形（載荷平行）	45×145	2個	130	1.49	1.28
13	溝状	台形（載荷直角）	45×145	2個	130	1.72	0.99
14	転写	逆台形（載荷平行）	40×140	2個	112	1.51	1.35
15		逆台形（載荷直角）	40×140	2個	112	1.87	1.18
16	10mm高	長方形	30×30	4個	36	—	1.65
17		長方形	30×30	8個	72	0.77	1.70
18		長方形	30×30	13個	117	1.28	—
19		正方形	60×60	1個	36	—	1.90
20		独立突起	60×60	2個	72	1.21	2.05
21		千鳥状	60×60	5個	180	3.05	—
22		転写	長方形	5個	101	1.56	1.35
23			逆台形	5個	80	1.34	1.60
24			上向き平行四辺形	5個	101	1.52	1.23
25			下向き平行四辺形	5個	101	1.65	—

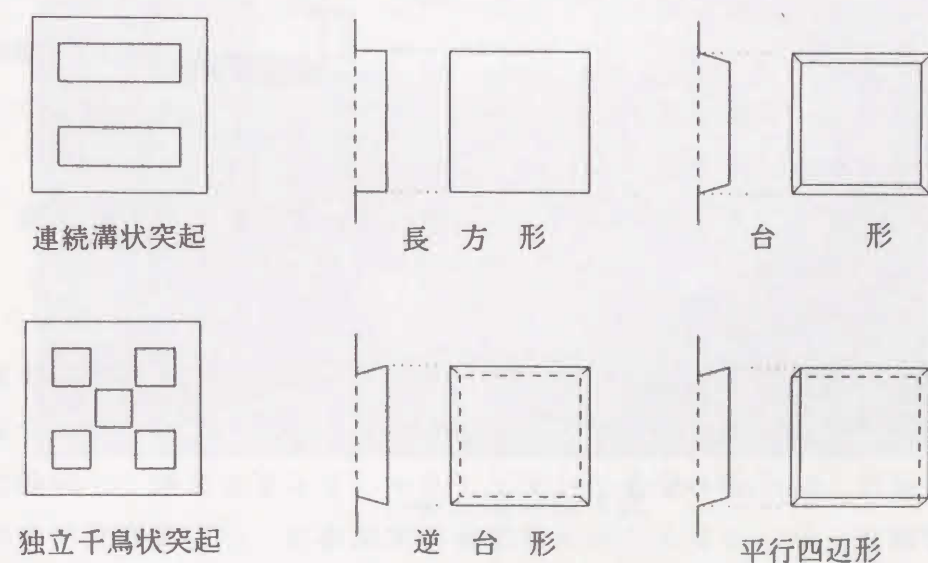


図-6.1 モルタル型枠の接合面（転写式）

乾燥収縮率，熱膨張係数などの違い，あるいは，はり，柱，壁などの部材に作用する曲げモーメントやせん断力によって，モルタル型枠と現場打ちコンクリートとの境界面には，その面に沿ってずれを起こさせるせん断応力が作用する。一般のコンクリートでは，せん断力のみで破壊することはほとんどないため，コンクリートのせん断強度試験が管理試験として採用されることがなく，現在のところわが国ではこの試験に関する規格はない。このせん断強度が問題となるのは，現状では，前述した打継ぎ面やプレキャスト部材の接合部といえる。

現在までに提案されているコンクリートのせん断試験は，直接せん断試験が主流で，他に押抜きせん断試験，3軸圧縮試験，ねじり試験などがある。直接せん断試験には，1面せん断試験，2面せん断試験，直応力が作用する場合の1面せん断試験，滑節四辺形わくによるせん断試験，はりに曲げモーメントゼロ区間を設けるルーマニア試験などがあるが，1面および2面せん断試験による繊維補強コンクリートのせん断強度に関する筆者らの過去の研究実績を参考に，供試体作製の容易さなどなら，モルタル型枠とコンクリートとの接合試験に2面せん断試験を採用することにした。

(2) 実験の概要

実験で採用した2面せん断試験方法を図-6.2に示す。また，写真-6.1はその試験後の供試体の状況である。使用した供試体は，内寸 $200 \times 200 \times 200$ mmの鋼製型枠を用いてあらかじめ作製した $25 \times 200 \times 200$ mmのモルタル板2枚を再びこの型枠内の側面に相対するように設置し，その間にコンクリートを打設して成形したサンドイッチ状の 200

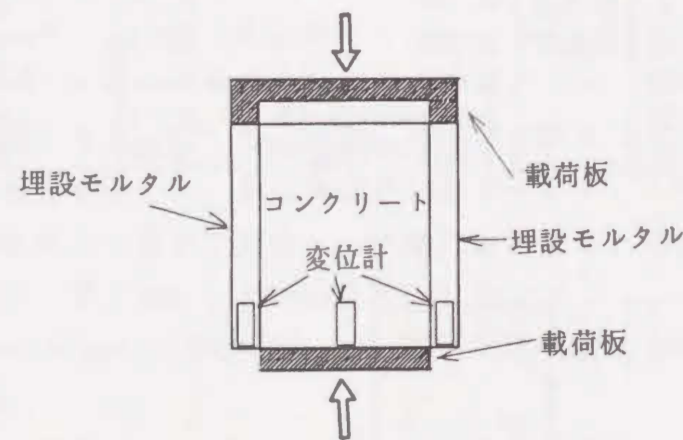
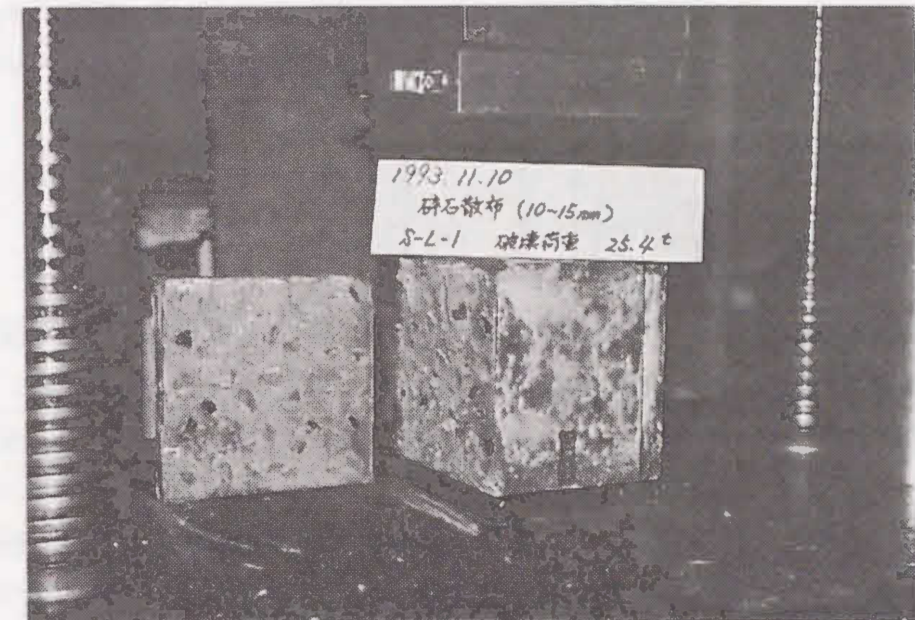


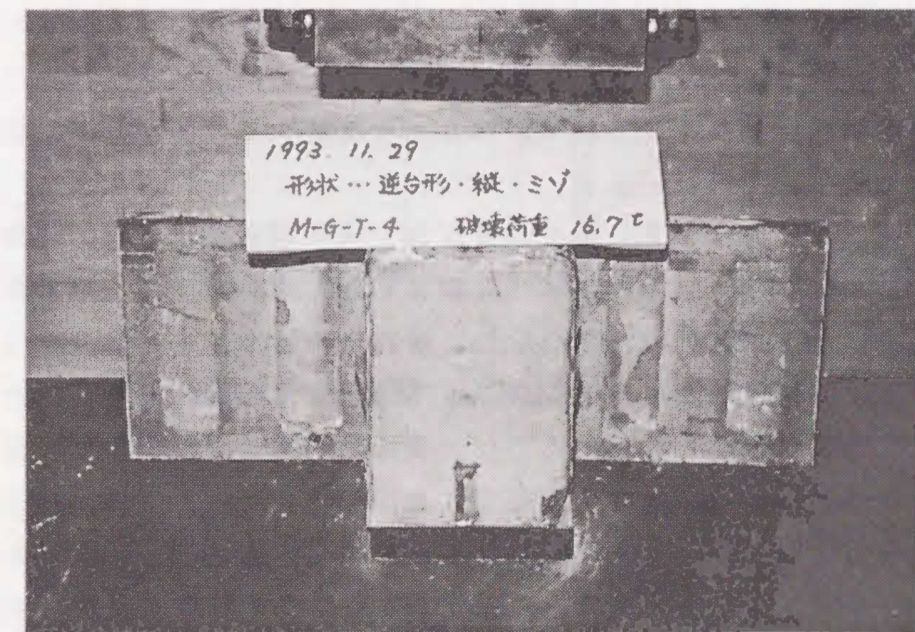
図-6.2 2面せん断試験

$\times 200 \times 200$ mmの立方体である。試験では，最大せん断応力であるせん断強度の他，初期ひびわれ発生強度やコンクリートとモルタル板とのずれ変位などを測定した。

モルタル板は，S10C45の配合でGタイプのメッシュを2枚配し，材齢14日まで養生の後に使用した。コンクリート打設後の供試体は， 20°C 湿潤養生を行って材齢28日で強度試験に使用した。また，凹凸の形状転写方式では，10mm厚の発泡スチロール板を転写用の型枠として合板に接着して使用した。



(1) 碎石散布埋込み式



(2) 連続溝状転写式

写真-6.1 2面せん断試験後の供試体

2枚のモルタル板間に打設するコンクリートは、普通ポルトランドメント、碎石、川砂、AE剤および上水道水を材料とし、粗骨材最大寸法が20mm、目標スランプが8cm、目標空気量が5%、水セメント比が50%、細骨材率が50%および単位水量が195kg/m³の配合で、標準養生による材齢28日強度が35.0MPaである。

供試体数は各条件について4個とし、強度試験結果には各測定値の平均値を使用した。

(3) 実験の結果と考察

2面せん断試験で得られたせん断応力とモルタル板のずれ変位との関係の一例を接合面処理の種類ごとに図-6.3~図-6.6に示す。また、最大応力であるせん断強度の平均値は表-6.1に示している。ここで、モルタル板を用いないコンクリート単体の試験結果(No.1)は、モルタル板位置にあるコンクリートをモルタル板と仮定して得られたものである。なお、図-6.7は、形状転写による凹凸の突起を設けた場合の2面せん断強度を、連続溝状突起と独立千鳥状突起とに2分し、突起付け根部断面積との関係として示したものである。

表-6.1より、コンクリート単体のせん断強度は5.35MPaと高いが、モルタル板の接合面になにも処理を施さなかった場合(No.2)のせん断強度は0.10MPaと非常に小さく簡単に剥離することがわかる。これは、ポリマーの使用による充てん効果や造膜効果などでモルタルの表面が非常に滑らかとなり、コンクリートとの接着性が悪くなったことによるものと考えられる。なお、ポリマーの使用でモルタルのブリーディングはほとんど生じなくなるため、レタンスなどによる接合性への悪影響はあまり考えられず、ポリマーセメントモルタルは、表面が滑らかで汚れも付着しにくいといえる。

したがって、ポリマーセメントモルタル板を永久埋設型枠として使用する際には、現場打ちコンクリートとの一体性を確保する対策を考える必要がある。しかし、表面が滑らかで、諸強度、遮へい性、接着性なども高いポリマーセメントモルタルの硬化後、ブラシがけやサンドブラストなどで接合面を粗くしたり、接合面を湿らせてモルタルなどを付けるのは、表面積が広くて薄肉の型枠製品ということもあり困難といえる。そこで本研究では、型枠用のモルタルが硬化する前に砕砂・碎石を散布して埋め込ませたり、溝状・千鳥状の凹凸形状をモルタル型枠用の型枠から転写することを考えた。

表-6.1では、砕砂・碎石の散布や溝状・千鳥状の形状転写によって接合面に突起を設けたモルタル板を埋設したコンクリートでは、突起部のモルタル断面積を100cm²(せん断応力作用面積の1/4)程度以下とした形状転写を除くと、コンクリート単体と比べて1/2~1/3程度のせん断強度が確保できることがわかる。

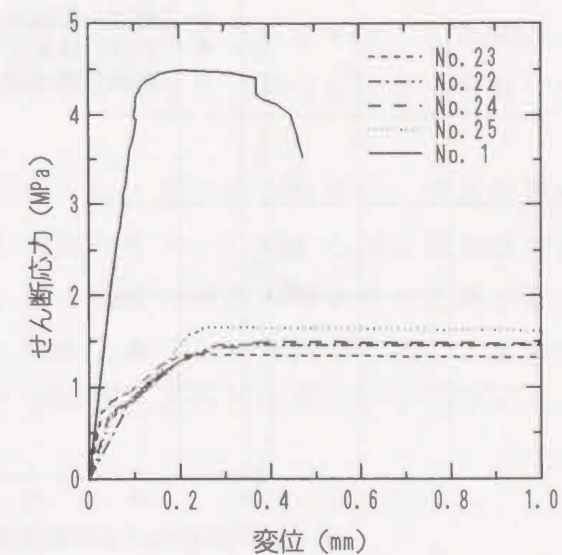
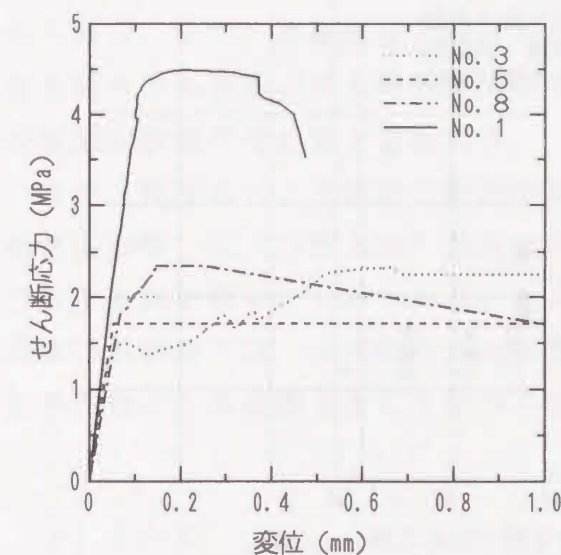


図-6.3 応力-変位関係(砕石砕砂) 図-6.4 応力-変位関係(千鳥状)

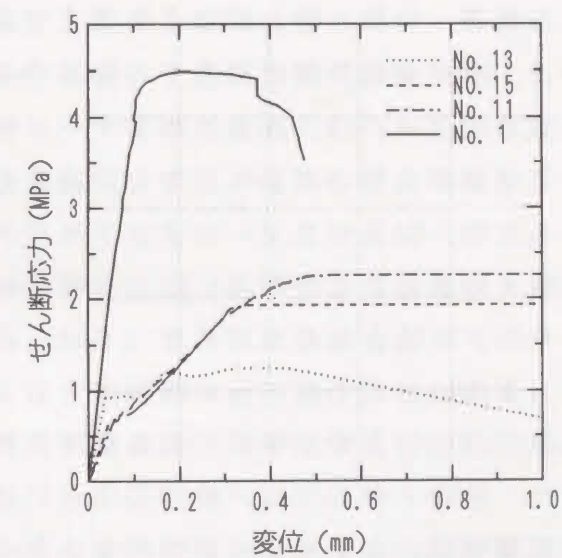
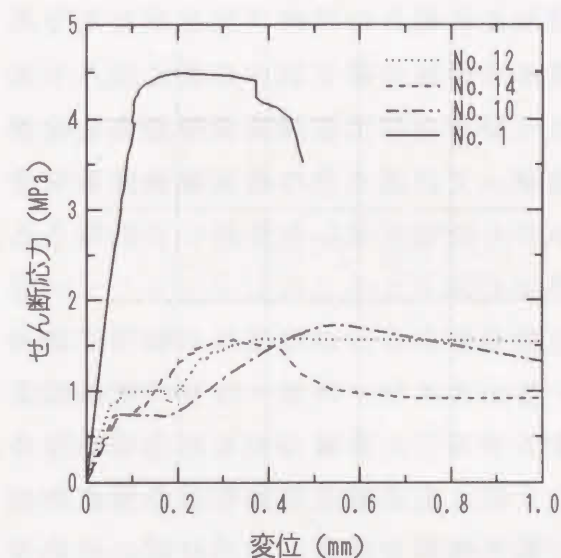


図-6.5 応力-変位関係(縦溝状) 図-6.6 応力-変位関係(横溝状)

また、応力と変位との関係を示した図より、最大せん断応力に達した後も剥離せず比較的高い耐力を保持することがわかる。

これは、モルタルと後打ちする現場コンクリートとの接着性の悪さから判断して、載荷面に位置する砕砂・碎石やモルタルの突起が有するせん断力やかみ合い効果などによるものといえる。したがって、凹凸の形状転写法では、コンクリートにくい込むモルタル側の突起面積の大きいほど、せん断強度が高くなる傾向が

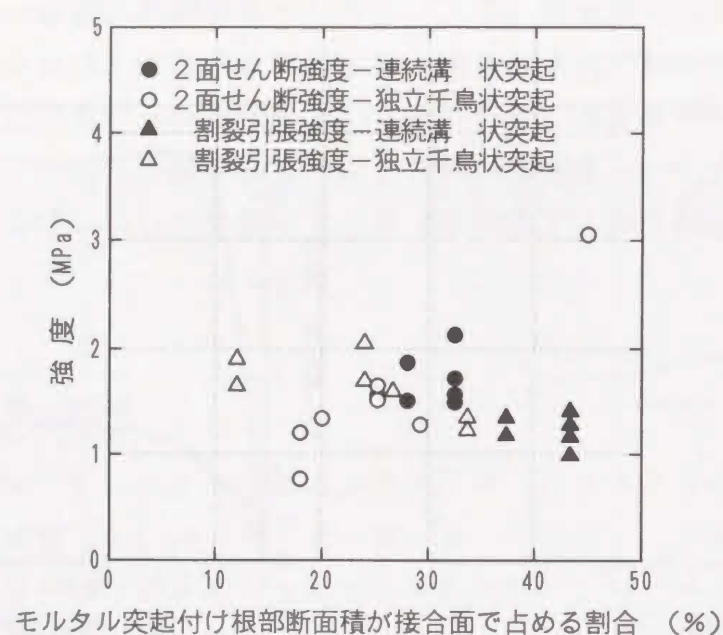


図-6. 7 接合面における突起付け根部断面積と強度との関係

みられる。なお、耐力がなくなるまで荷重を加えた場合の試験状況を示した写真では、接合面の突起に相当する砕石やモルタルの破壊の様子がうかがえる。

SA系ポリマーは、通常のポリマーと同様にモルタルの引張強度や接着力を改善する効果が大きいばかりでなく、通常のポリマーでは弱点となる圧縮強度も増進するため、SA系ポリマーセメントモルタルのせん断強度はかなり高いと推測され、砕砂・砕石によるかみ合いにも有利といえる。

モルタル接合面の処理法としては、砕砂・砕石散布の方が凹凸形状転写に比べて、全体的に若干高いせん断強度を有している。これは、砕砂・砕石の断面による抵抗力に加えて、形状や表面粗度の関係する接着力が影響したものと思われる。また、砕砂・砕石では、粒径の小さい砕砂を全面に密に散布したものの強度はかなり高いが、フレッシュ状態のモルタルへの散布時期を考慮しなければ、砕砂が埋没したり逆に付着しなかったりする恐れがあり、モルタルの板厚にもよるが、比較的大きな粒径の砕石を多く散布する方が、強度的にも優れており、フレッシュモルタルでの沈下にも対してもモルタル内部に配したメッシュが支えとなるなどの効果も期待でき、沈下分だけ高価なポリマーセメントモルタルの量も多少節減できるので得策といえる。

凹凸の形状転写法では、モルタル側の突起付け根部断面積が大きいほどせん断強度が高くなる傾向があり、独立千鳥状と連続溝状との間には差異があまりないことがわかる。しかし、独立千鳥状では、突起寸法の大きい方がせん断強度が若干高くなる傾向もみられる。突起の大きいものを少し配置する方が、小さいもの

を多く分散させるよりせん断強度が多少高いのは、構造的な断面剛性に加えて、後打ちしたコンクリートとモルタルとの接合層における充てん性などが原因と考えられる。また、連続溝状突起の場合に荷重方向と溝の方向を平行とした場合よりも直角とした方がせん断強度が高くなる現象もあり、FEMなどによる解析やその検証実験が今後必要と思われる。

また、転写法による突起の断面形状については、連続溝状の場合、突起の断面形状が剥離しにくい逆台形や長方形の方が成形しやすい台形のものより強度的には若干有利となることがわかる。しかし、ある程度の突起面積を有した形状転写による供試体では、全体的なせん断強度に大きな違いがみられないので、接合面の処理法としては製品としてのつくりやすさが優先されるのではないかといえる。

(4) まとめ

永久埋設型枠製品用モルタルと現場打ちコンクリートとの一体性評価のために行った2面せん断試験に関する本検討結果を以下に要約する。

- ①突起のないモルタル型枠は、接合面が滑らかで汚れも付着しにくいため、コンクリートに埋設した場合の接合面におけるせん断強度がほとんどなく、簡単に剥離するが、砕砂・砕石の散布による埋込みや溝状・千鳥状の凹凸形状転写によって接合面に突起を設けた型枠では、コンクリート単体と比べて1/2～1/3程度のせん断強度が確保でき、最大せん断応力後も剥離せずかなりの耐力を保持できる。
- ②コンクリートとのモルタル接合面の処理法としては、砕砂・砕石散布の方が形状転写に比べて若干高いせん断強度を有しており、接合性に優れる。
- ③砕砂・砕石をコンクリートと接合するモルタル面に埋込む場合には、モルタルの板厚に応じて粒径の大きい砕石を多く使用するのが、せん断強度、成形性、経済性などの点で有利となる。
- ④凹凸形状を転写したモルタルとコンクリートとの接合面におけるせん断強度は、モルタル側の突起付け根部断面積が大きいほど高く、独立千鳥状よりも連続溝状の凹凸形状の方がやや高いせん断強度を有する。
- ⑤独立千鳥状の形状転写では、突起の寸法の大きい方がせん断強度が若干高く、突起の断面形状による影響はあまりないが、連続溝状では、溝の方向を荷重方向に平行とするよりも直角の方がせん断強度がやや高く、突起の断面形状が剥離しにくい逆台形や長方形の方が成形しやすい台形などのものよりやや有利となる。

6. 3 引張応力下での接合性

(1) 序説

建築用のコンクリート構築物では、修景材あるいはしゃへい材としてタイルなどを張り付けることが多いが、施工の良否、コンクリートとの変形性能などによって、これらが剥離して落下する危険性があり、これらの接着力を試験する必要がある。その試験法には、力学的な建設省建築研究所（建研）式の接着力試験器、あるいは供用中の剥離状態を調べるための赤外線や弾性波などを利用した非破壊検査などがある。構造物の耐久性や意匠性を高める目的で使用し、タイルなどよりも1枚の面積や重量が大きい永久型枠では、剥離が死活問題となり得る。また、モルタル型枠と現場打ちコンクリートとの複合体に様々な応力が作用する構造部材では、正反繰返し荷重や偶発荷重などで、接合面に直応力が作用することも考えられる。

そこで、本研究でも、埋設モルタルと現場打ちコンクリートとの接合面に引張応力を作用させる検討を行うこととした。

この検討には、前述した建研式の接着力試験やコンクリートの引張試験が適すると考えられる。しかし、接着力試験では、 $100 \times 100 \text{ mm}$ 程度までの比較的小さな接着面積が対象となり、一般的な建築用コンクリートと比べると耐久性が求められる土木用コンクリートは強度が高いために載荷用鋼板と供試体との接着力を大きくする必要もあり、今回の実験では採用しなかった。

脆性材料であるコンクリートに特殊な治具、補強鋼材、接着材などを利用する直接引張試験、遠心力や液圧で引張力を生じさせる試験スリットなどを設ける局部引張破壊試験でも、砕砂碎石散布や溝状千鳥状の形状転写の影響を調査するには供試体の寸法や成形法に問題がある。また、ポリマーセメントモルタルに関するJIS A 6023では、建研式の接着力試験と同様な接着強さ試験が記載されているが、この接着面積も $40 \times 40 \text{ mm}$ と小さく、接合面の突起処理の評価には不適といえる。そこで本実験では、比較的試験方法が容易で接合面積を大きくとれるという点に着目し、コンクリートで一般的に行われる円柱供試体による割裂引張試験を応用することにした。

(2) 実験の概要

実験で採用した割裂引張試験方法を図-6. 8に示す。また、写真-6. 2はその試験後の供試体の状況である。

使用した供試体は、鋼製円柱型枠を使ってあらかじめ作製したモルタル製半円柱を再び円柱型枠内に配置し、残りのスペースにコンクリートを打設して成形した $\phi 150 \times 200 \text{ mm}$ の円柱である。試験では、最大引張応力となる引張強度の他に、初期ひびわれ発生荷重や塑性ゲージによるコンクリートとモルタルとの接合面の開きによるひずみなどを測定した。

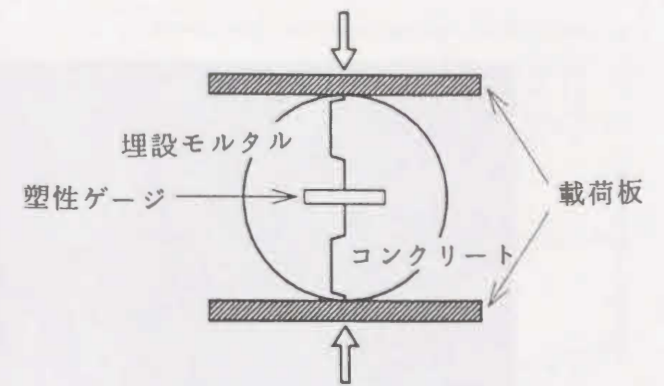


図-6. 8 割裂引張試験

モルタル半円柱は、S10C45の配合でメッシュは供試体形状を考慮して使わず、材齢14日まで養生の後に使用した。コンクリート打設後の供試体は、 20°C 湿潤養生を行って材齢28日で強度試験に使用した。また、凹凸の形状転写方式では、10mm厚の発泡スチロール板を転写用の型枠として合板に接着して使用した。

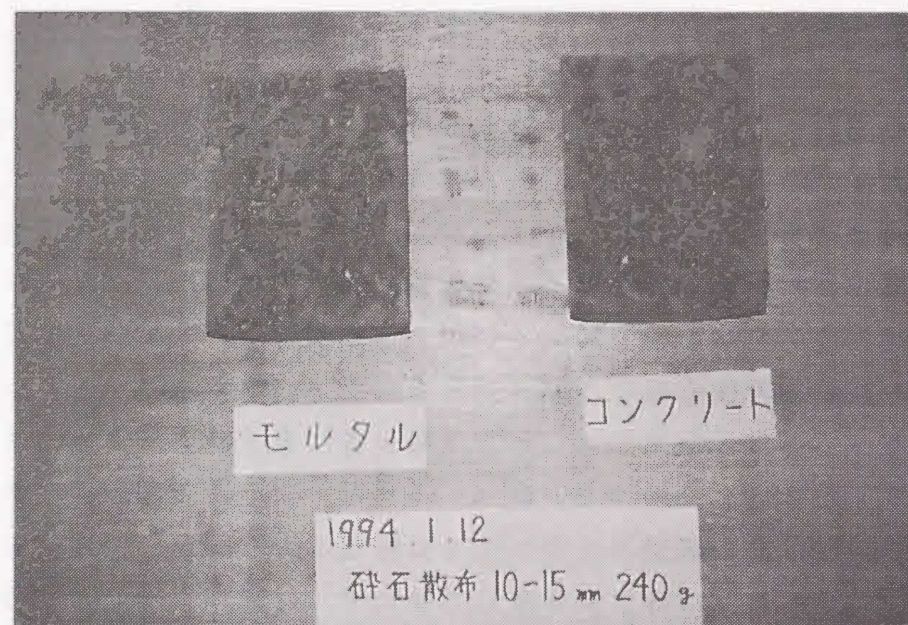
モルタルを埋設する現場打ちコンクリートは、前節の2面せん断試験で使ったものと同じとした。

供試体数は各条件について4個とし、強度試験結果には各測定値の平均値を使用した。

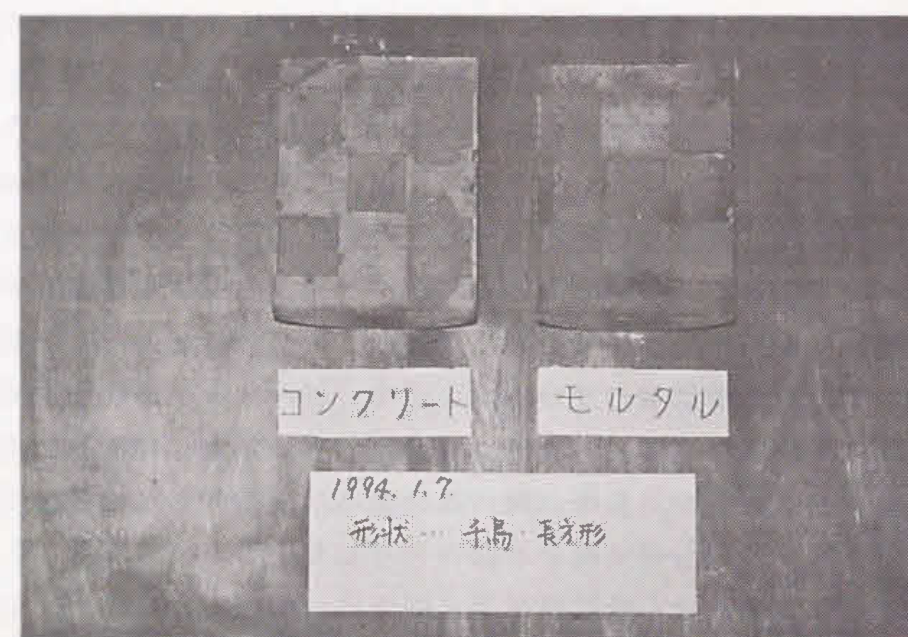
(3) 実験の結果と考察

割裂引張試験で得られた引張応力と接合面でのひずみとの関係の一例を接合面処理の種類ごとに図-6. 9～図-6. 12に示す。また、最大応力である引張強度の平均値は表-6. 1に示している。ここで、モルタル半円柱を用いないコンクリートのみの試験結果（No. 1）は、コンクリート単体としての割裂引張試験で得られたものである。なお、前節の図-6. 7には、凹凸形状転写法における突起付け根部断面積と割裂引張強度との関係を示している。

表-6. 1より、2面せん断試験結果と同様に、突起のないモルタル型枠とコンクリートとの接合面での引張強度はほとんどなく、容易に剥離することがわかる。また、砕砂・碎石の埋込みや連続溝状・独立千鳥状の凹凸形状転写によって接合面に突起を設けた型枠では、コンクリート単体と比べて $1/2 \sim 1/4$ 程度の引張強度が得られており、引張応力-ひずみ関係を示した図からは、最大引張応力



(1) 砕石散布埋込み式



(2) 独立千鳥状転写式

写真-6.2 割裂引張試験後の供試体

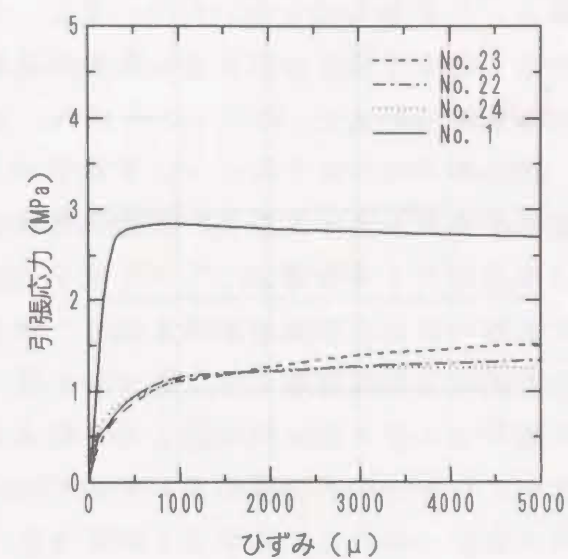
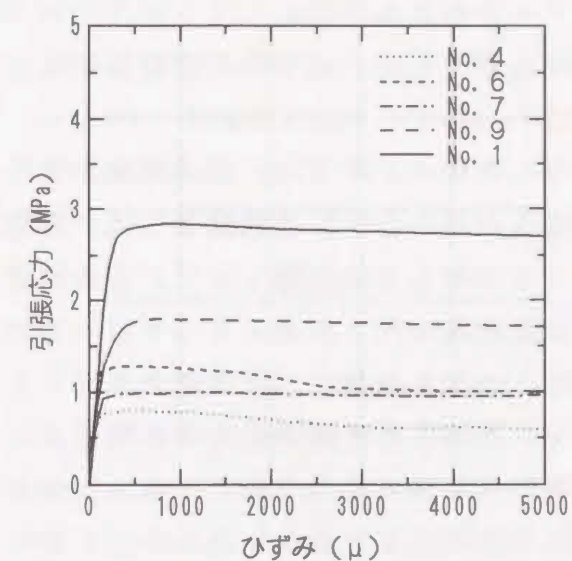


図-6.9 応力-ひずみ関係(砕石砕砂) 図-6.10 応力-ひずみ関係(千鳥状)

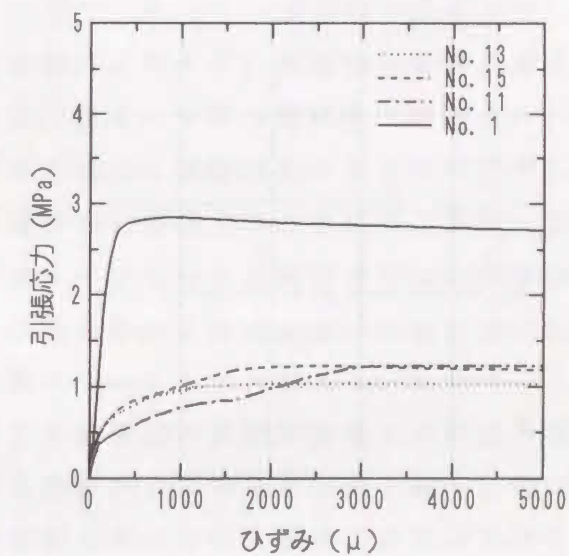
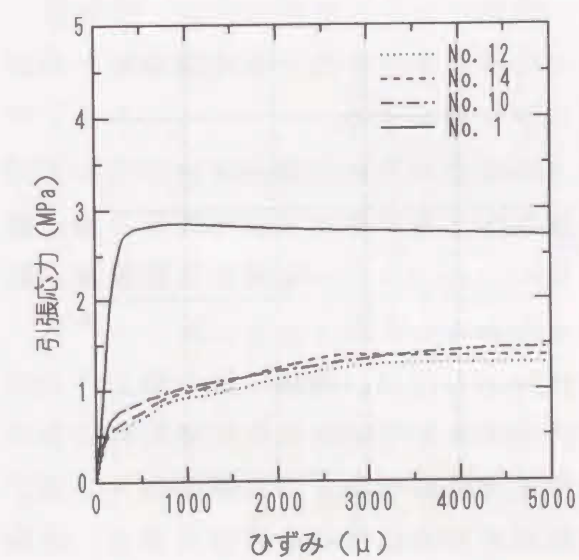


図-6.11 応力-ひずみ関係(縦溝状) 図-6.12 応力-ひずみ関係(横溝状)

後もかなりの耐力を保持できることがわかる。しかし、コンクリートと接合するモルタル面の処理法としては、砕砂・砕石を使用したものと凹凸形状を転写したものとの引張強度に関する明瞭な違いはみられない。

砕砂・砕石をコンクリートとの接合面に使用したモルタルでは、粒径の大きい

碎石を多く散布したものの引張強度が高くなる傾向があるが、これはポリマーの使用によるモルタルの接着力増進効果、碎石とコンクリートとの機械的な摩擦効果などによるものと思われる。また、モルタル型枠の板厚に応じて大きめの碎石を多く使用することは、せん断強度の検討でも述べたが、成形性や経済性にも利点があるといえる。

凹凸形状をコンクリートとの接合面に転写したモルタルでは、連続溝状よりも独立千鳥状の方がやや高い引張強度を有することがわかる。連続溝状では、突起の断面形状が型枠製品としての成形性に適した台形よりも剥離しにくい逆台形や長方形の方が引張強度が若干高く、溝の方向は載荷方向と直角よりも平行の方がやや高い引張強度を示すことがわかる。また、独立千鳥状では、突起の断面が長方形やモルタル板の付着性と成形性を加味した断面として採用した平行四辺形と比べて引っかけり効果の高い逆台形の方が高い引張強度を得ている。なお、突起の寸法については、この寸法が大きい方が引張強度は高い傾向にあるが、応力-ひずみ曲線の傾きが最初に変化する応力といえる初期ひびわれ発生強度は、突起数が多い方がやや高くなる傾向もみられる。

(4) まとめ

永久埋設型枠製品用モルタルと現場打ちコンクリートとの一体性評価のために行った割裂引張試験に関する本検討結果を以下に要約する。

- ①突起のないモルタル型枠とコンクリートとの接合面での引張強度はほとんどなく、簡単に剥離するが、砕砂・碎石散布や溝状・千鳥状転写によって接合面に突起を設けた型枠では、コンクリート単体と比べて $1/2 \sim 1/4$ 程度の引張強度が確保でき、最大引張応力後も剥離せずにかんりの耐力を保持できる。
- ②コンクリートと接合するモルタル面の処理法としては、砕砂・碎石散布の方が形状転写に比べて若干高い引張強度を有し、モルタルの板厚に応じて粒径の大きい碎石を多く使用するのが、引張強度、成形性、経済性などの点で有利となる。
- ③形状転写によりコンクリートと接合するモルタル面に凹凸を設ける場合、連続溝状よりも独立千鳥状の方がやや高い接合面での引張強度を有する。
- ④連続溝状の凹凸形状を転写したモルタルとコンクリートとの接合面での引張強度は、成形性に適した台形の突起断面よりも剥離しにくい逆台形や長方形の方が若干高く、載荷方向と直角な溝の方向よりも平行の方がやや大きい。
- ⑤独立千鳥状の場合、凹凸形状を転写したモルタルとコンクリートとの接合面での引張強度は、引っかけり効果のある逆台形の突起断面で最も大きく、突起寸法が大きい方が多少高くなり、初期ひびわれ発生強度は突起数が多いほどやや高くなる。

6. 4 総括

連続繊維補強ポリマーセメントモルタル製の永久埋設型枠と現場打ちコンクリートとの一体性を評価するため、砕砂や碎石の散布による埋込みあるいは連続溝状や独立千鳥状凹凸の形状転写によって、コンクリートと接合するモルタル面に突起を設けた場合の接合性を、2面せん断試験や割裂引張試験で調査した本章の検討結果を以下に要約する。

- ①ポリマーセメントモルタルは表面が滑らかで汚れも付着しにくいため、コンクリートとの接合面に一体性を高める処理を施さない場合は、接合面における2面せん断強度や割裂引張強度がほとんどゼロに等しく、簡単に剥離する。
- ②砕砂・碎石や凹凸形状で突起を設けた埋設モルタルと現場打ちコンクリートとの接合面の2面せん断強度や割裂引張強度は、水セメント比が50%のコンクリート単体と比べて数分の1程度の値を有しており、最大応力後の耐力もかなり高いので接合性は比較的良いといえる。
- ③2面せん断強度や割裂引張強度試験の結果、埋設モルタルの接合面は、縦打ち成形法や平打ち成形法が利用できる凹凸形状転写よりも、平打ち成形法が原則となる砕砂・碎石の埋込みによる突起の方が有効で、モルタル製型枠の断面厚さに応じて粒径の大きい碎石を多く使用するのが強度、成形性、経済性などの点で有利となる。
- ④凹凸形状転写法をモルタル埋設板に採用する場合、現場打ちコンクリートとの接合面のせん断強度はモルタル側の突起の付け根部断面積が大きいほど高く、割裂引張強度は寸法が大きくてコンクリートにくい込む逆台形断面の突起を有するモルタルが高いが、初期ひびわれ発生時の引張強度は突起数の多いものが多少高い。
- ⑤モルタル埋設板の凹凸形状転写法では、モルタル側の突起断面積が全接合面積の $1/3 \sim 1/4$ 程度の場合、突起断面を剥離しやすい台形断面としない限り、コンクリートとの接合面におけるせん断強度や引張強度に及ぼす様々な突起の形状の影響は小さいため、強度面よりも製品工場での成形性を優先し、独立千鳥状よりも連続溝状としてその突起断面を長方形とするのが良い。

第7章 モルタル型枠を埋設した鉄筋 コンクリートはりの性状

7.1 概説

建設工事では、施工の合理化や省人・省エネルギー、建設物の品質や労働者の安全面の管理強化、現場における環境や景観および地球環境への配慮などを目的として、コンクリートにおけるプレハブ化・プレキャスト化が普及しつつある。とくに、構造部材の一部をプレキャスト化し、現場に輸送して組立て、現場打ちコンクリートで一体化させるハーフプレキャスト工法が、現場打ちコンクリートのみによる従来工法とプレキャスト工法との利点を融合させたものとして、最近注目されている。セメント系薄肉板を使用する永久埋設型枠工法もこの流れに沿うものであるが、わが国の交通事情、建造物の規模や立地条件、コンクリート製品工場、レディーミクストコンクリート工場および建設現場の関係、従来工法でつくりあげてきた労働者の技能、工事用の資材や機械などを考慮すると、構造物で最も重要な表層部に必要最小限のプレキャスト化を施すこの工法は、現状を見据えたパーシャルプレキャスト工法とでも呼ぶべきものである。

このような永久埋設型枠板は、一般的なはり、柱、壁あるいは床部材に始まり、大型製品の輸送や据付けの難しい市街地や急峻な山岳地域などで建設される構造物、海洋、寒冷地、地中などの厳しい環境にさらされるコンクリート、脱型作業の困難な地下構造物などと用途は広範で、さらに補修・補強板への応用、板単体としての防音板、落下防止板、目隠し板などへの利用も考えられる。

ハーフプレキャスト工法の利点の一つに、フルプレキャスト工法では得にくい構造物部材としての一体性がある。つまり、建設構造物は概して大規模であり、輸送などの制約上、後者ではブロック化されたものを接合する技術が必要となるが、前者では従来工法と同様に現場打ちされる鉄筋コンクリートにその機能を負わせることが可能であり、通常の合板型枠に近い形で利用できる薄肉永久埋設型枠工法ではさらに有利となる。しかし、永久型枠と現場打ちコンクリートとの一体性が確保できない場合には、耐久性、美観、第三者影響性などに大きな支障となる。逆に、様々な条件のもとで十分な一体性が得られるならば、強度や靱性などに優れた永久埋設型枠が構造部材断面として認められたり鉄筋などの補強材の一部に利用される可能性がある。

本章では、鉄筋コンクリート部材の基本的な構造形式である鉄筋コンクリート

はりを取り上げ、これに10mm厚の連続繊維補強ポリマーセメントモルタル板を埋設させ、漸増繰返し曲げ載荷試験を行い、モルタル埋設板と現場打ちコンクリートとの接合性、曲げ性状、せん断性状などを検討することとした。

7.2 鉄筋コンクリートはりの作製と載荷方法

(1) 鉄筋コンクリートはりの作製

実験で使用した鉄筋コンクリートはりの諸条件を表7.1に示す。

実験の要因としては、モルタル板のポリマー結合材比、ガラス繊維メッシュの積層枚数、モルタル板における継目の有無、モルタル板の接合面処理に使用する砕砂の粒径と使用量、はりの引張側主鉄筋量およびはりのせん断スパン有効高さ比を取り上げた。

供試体は、図7.1に示すように、載荷時引張下縁側に10×150×1200mmのモルタル平板を埋設した□150×150×1200mmの鉄筋コンクリートはりで、引張側主鉄筋は有効高さ120mmで2本使い(No.18;主鉄筋1本, No.19;主鉄筋なし)、せん断スパンに100mmピッチでスターラップを配した(No.19~No.21;スターラップなし)。

型枠用モルタルは、早強ポルトランドセメント、砕砂、SA系ポリマーディスパージョン、消泡剤および上水道水を用い、配合はS10K40およびPL0K55とし(表3.3参照)、材齢14日(7日間の20℃湿潤養生の後は20℃乾燥養生)で鉄筋コンクリートはりに使用した。なお、補強用メッシュは、エポキシ樹脂で結合したEガラス繊維メッシュのGMである(表4.1参照)。

現場打ちコンクリートは、早強ポルトランドセメント、碎石、川砂、AE減水剤、および上水道水を使用し、粗骨材最大寸法が20mm、目標スランプが8cm、目標空気量が5%、水セメント比が50%、細骨材率が43%および単位水量が162kg/m³の配合で、はりの載荷試験を行った材齢14日(7日間の20℃湿潤養生の後は20℃乾燥養生)の圧縮強度は34.3MPaである。

鉄筋は、主鉄筋用にD13(降伏強度;342MPa)とD10(降伏強度;366MPa)の2種、およびスターラップ用にD6(降伏強度;400MPa)を使用した。

鉄筋コンクリートはりの引張下縁に埋設する10×150×1200mmモルタル板のコンクリートとの接合面には、前章の検討で比較的良好な結果を得た砕砂・碎石を散布して埋込ませて突起を設ける処理法を参考に、砕砂の粒径や使用量などを要因として載荷試験を行った。はり供試体の寸法、モルタル板の成形性、経済性お

よびフレキシブル性を考慮して埋設板の厚さを10mmの薄肉としたため、碎石ではなく砕砂を使用した。また、モルタルが若干軟らかい状態で行ったワイヤブラシがけによる粗面処理も一部採用した。

接合面処理に使用した砕砂は、表乾比重が2.58の砂岩砕砂で、粒径が1.2~2.5mmと2.5~5mmの2種とした。

表-7.1 鉄筋コンクリートはりの実験条件と実験結果

番号	主鉄筋	せん断 スパン 高さ比	10mm厚モルタル埋設型枠板				ひびわれ 発生荷重 (kN)	主 鉄 筋 降伏荷重 (kN)	最大耐力 (kN)
			ポ ー リ マ ー 結 合 材	メ ッ シ ュ 枚 数	継 目 本 数	接 合 面 処 理			
1	2-D13	3.0	な し				9.3	64.6	75.1
2			0.10	2	0	なし	18.3	73.1	83.0
3						A	17.5	73.2	82.9
4						B	14.5	69.1	79.8
5						C	18.8	70.4	80.0
6						D	16.7	69.3	78.4
7						なし	21.7	71.6	88.3
8			4			A	20.1	73.0	89.0
9						B	20.1	74.7	88.3
10						C	19.7	72.4	87.0
11						D	21.7	72.6	88.8
12							8.7	57.2	81.5
13							10.0	62.7	80.0
14			0.00	2	0	E	11.9	66.3	79.0
15			0.10				18.1	68.5	85.4
16	2-D10		な し				6.9	39.6	58.2
17	0.10		2	0	D	17.1	43.3	60.1	
18						1-D10	13.0	30.8	36.1
19						なし	—	—	—
20	2-D13	2.0	な し				13.6	—	120.6
21			0.10	2	0	D	23.4	—	134.2

注) モルタル板の接合面処理は、Aが1.2~2.5mm砕砂0.75kg/m²、Bが1.2~2.5mm砕砂1.50kg/m²、Cが2.5~5mm砕砂0.75kg/m²、Dが2.5~5mm砕砂1.50kg/m²を成形後に散布したもので、Eはワイヤブラシでモルタル板を粗面仕上げしたものである。

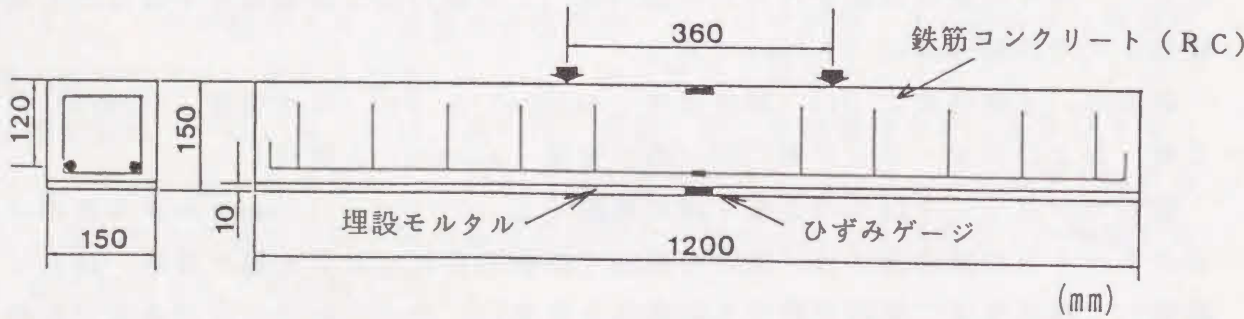


図-7.1 鉄筋コンクリートはりの形状

(2) 鉄筋コンクリートはりの荷重方法

はりの曲げ試験は、図-7.1に示すように、荷重点間距離が360mmで支点間距離を1080mmとした3等分点荷重法とし(せん断スパン有効高さ比;3)、モルタル板とコンクリートとの接合性評価のために漸増繰返し荷重(No.16~No.19;単調増加形荷重)を行った。なお、せん断性状の検討では、荷重点間距離が360mmで支点間距離を720mmとし(せん断スパン有効高さ比;2)、単調増加形の荷重法とした。測定項目は、はりのスパン中央部でのたわみ、主鉄筋ひずみおよび圧縮縁コンクリートひずみで、ひびわれ発生荷重、主鉄筋降伏荷重、最大耐力、ひびわれ進展状況なども調査した。

漸増繰返し荷重は、引張側主鉄筋のひずみが500μ、1000μおよび1500μとなった時点で除荷荷重を10回繰返ししながら荷重を増す方法とし、主鉄筋が降伏した直後に相当する中央たわみがスパンの1/200の時点(たわみ;5.4mm)、および鉄筋の降伏が進行してモルタル板を使用しない鉄筋コンクリートのみのはりや接合面処理を施さないモルタル板を埋設したはりでは耐力が低下し始める中央たわみがスパンの1/50の時点(たわみ;21.6mm)とで、接合面に生じるひびわれ長さを測定した。

7.3 モルタルとコンクリートとの接合性

(1) 序説

モルタル板を永久埋設型枠として鉄筋コンクリート構造物に利用する場合、部材の耐久性や外観の改善はもちろん、部材の耐力の向上あるいはこれに伴う鉄筋量や部材断面の節減も可能となれば、永久型枠の価値がさらに増すことになる。しかし、これらを期待するには、モルタル板の強度はもとより、これと現場打ちコンクリートとの一体性が大切となる。また、ひびわれが接合面に生じれば、その結果として部材の耐久性や美観も悪化し、第三者に与える危険性も高まる。

永久埋設型枠を使用した鉄筋コンクリートの荷重試験に関する報告は、ここ数年みられるようになっており、型枠の接合面に砂を接着したり、碎石や砂利を埋込んだり、骨材を洗い出したり、網目をつけるなどの処理で比較的良好な一体性を得られてはいるが、支点付近でコンクリートと型枠との定着が切れると破壊が急激に進行すること、はりの圧縮側に埋設した型枠では層間剥離を起こしやすいことなどの指摘もある^{116~118)}。

前章では、埋設モルタルと現場打ちコンクリートとの一体性を、接合面に直接応力を作用させ、モルタル板の接合面処理の有効性を検討したが、本章では、より現実に近い評価法として、構造部材断面の検討で最も基本的な単鉄筋長方形断面の鉄筋コンクリートはり部材に繰返し曲げ荷重を行って、両者の一体性ならびに埋設モルタル側の接合面処理の適性を調査した。

(2) 実験の結果と考察

ガラス繊維メッシュを4枚配したポリマー結合材比が0.10のSA系モルタル板について、コンクリートとの接合面に粒径や使用量を変えた砕砂を埋込み、これを鉄筋コンクリートはりの引張下縁に埋設し、漸増繰返し曲げ荷重を行って得られたモルタル板とコンクリートとの接合面に沿って生じるひびわれ長さを図-7.2に示す(供試体; No.7~No.11)。また、図-7.3~図-7.9は、鉄筋コンクリートはりの荷重試験で得られた代表的な荷重-たわみ曲線であり、鉄筋コンクリートはりの耐力が最大値を越えて明らかに低下し始めた時点でのひびわれ状況を図-7.10および図-7.11に示す。なお、鉄筋コンクリートはりの荷重試験状況およびひびわれ状況の一例を各々写真-7.1および写真-7.2に示す。

これらの図や実験状況より、接合面処理を施さないモルタル板を埋設したはり(No.7)および1.2~2.5mm砕砂を 0.75kg/m^3 使用したモルタル板を埋設したはり(No.8)では、主鉄筋ひずみが 1500μ での繰返し荷重中に接合面にひびわれが入り始め、主鉄筋が降伏域に入ってからたわみが急増するのにもともなって剥離が顕著となることがわかった。一方、1.2~2.5mm砕砂を 1.50kg/m^3 用いたモルタル板を埋設したはり(No.9)や2.5~5.0mm砕砂を 0.75kg/m^3 および 1.50kg/m^3 としたモルタル板を埋設したはり(No.10およびNo.11)では、主鉄筋が降伏する前の繰返し荷重中には剥離が起きず、鉄筋の降伏によるたわみの増加とともに接合面にひびわれが入り始め、たわみの進行とともにひびわれも進展することがわかった。このことから、永久埋設型枠のコンクリートとの接合面には、使用するモルタル板の厚さに応じて粒径の大きい砕砂を埋込んで突起を形成するのが、両者の一体性を考える上で有効といえる。これは、突起に使う砕砂の粒径を大きくすることで、モルタルやコンクリートとの付着性の改善に、接着力だけでなく機械的な噛み合いの作用が加わることによるものと思われる。また、粒径の小さい砕砂の場合は、その使用量を増してモルタルの接合面全体に突起を設けるのが良いといえる。

モルタル接合面の処理法として、ワイヤブラシによる粗面化も本実験で採用したが、この処理を施したモルタル板を用いたはり(No.11)のひびわれ性状を示した図より、ワイヤブラシ処理を使用したはりでは、終局状態をすぎても付着面にはひびわれがほとんど入らず、高い接合性を有することがわかる。

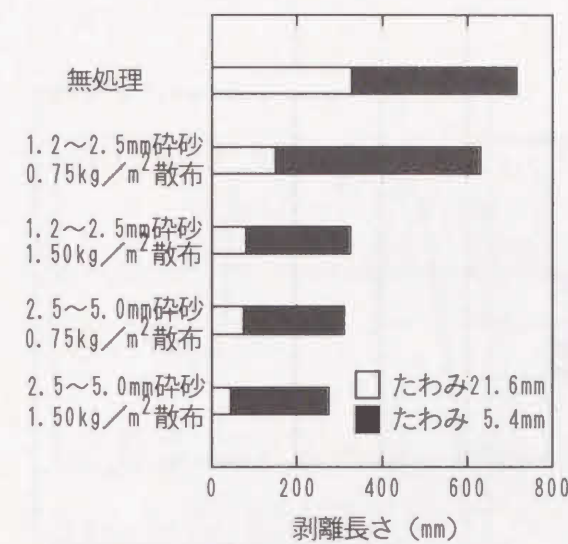


図-7.2 接合面のひびわれ長さ

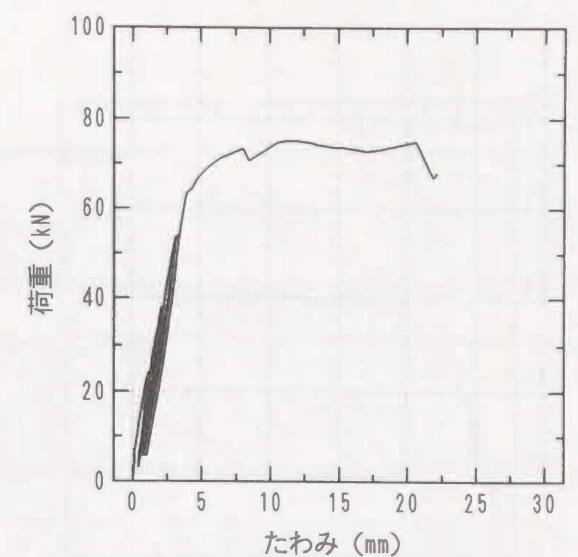


図-7.3 荷重-たわみ曲線 (No.1)

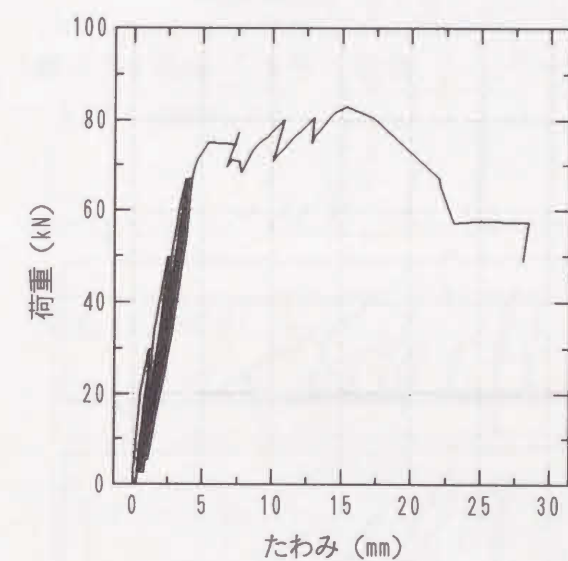


図-7.4 荷重-たわみ曲線 (No.2)

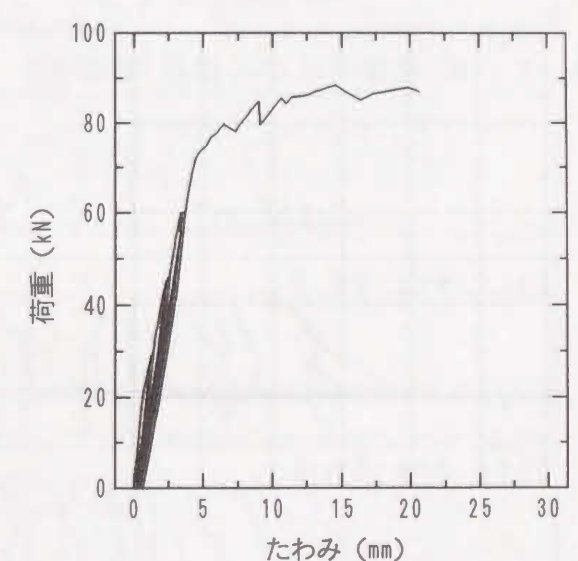


図-7.5 荷重-たわみ曲線 (No.7)

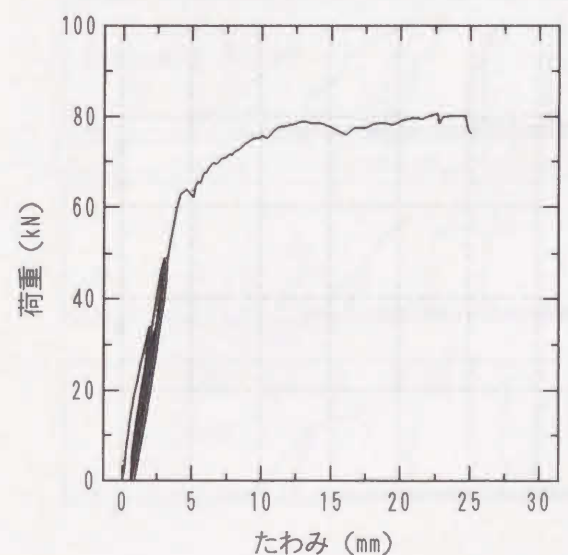


図-7.6 荷重-たわみ曲線 (No.12)

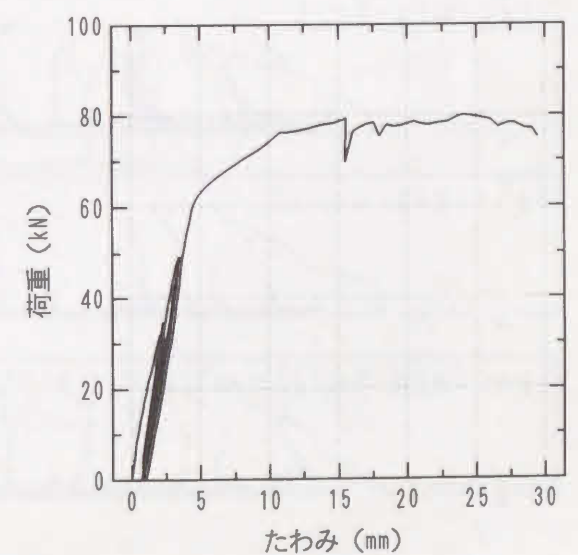


図-7.7 荷重-たわみ曲線 (No.13)

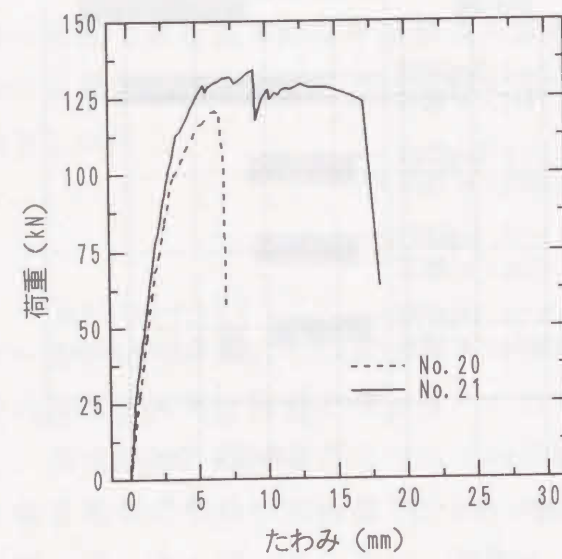
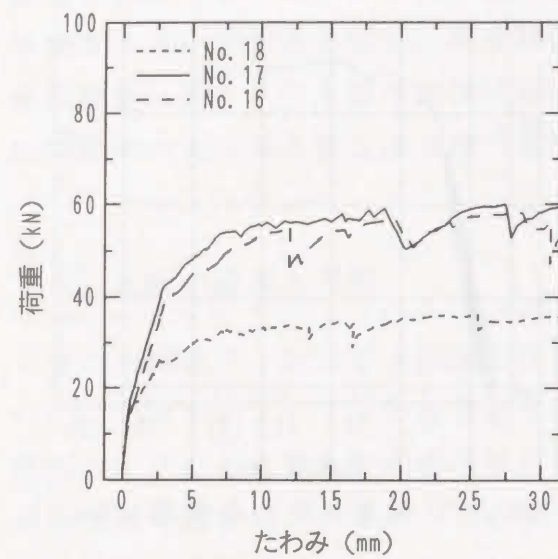


図-7.8 荷重-たわみ曲線(鉄筋量) 図-7.9 荷重-たわみ曲線(せん断)

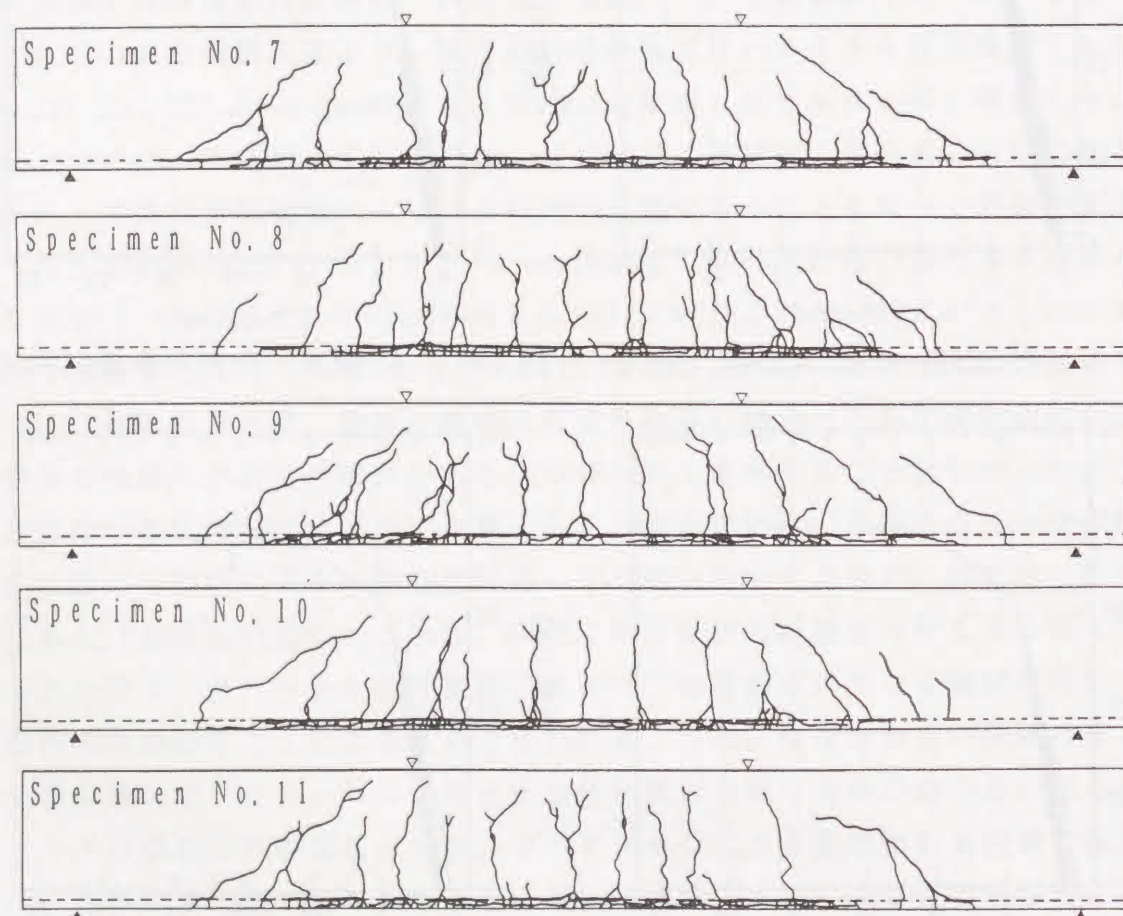


図-7.10 鉄筋コンクリートはりのひびわれ状況(1)

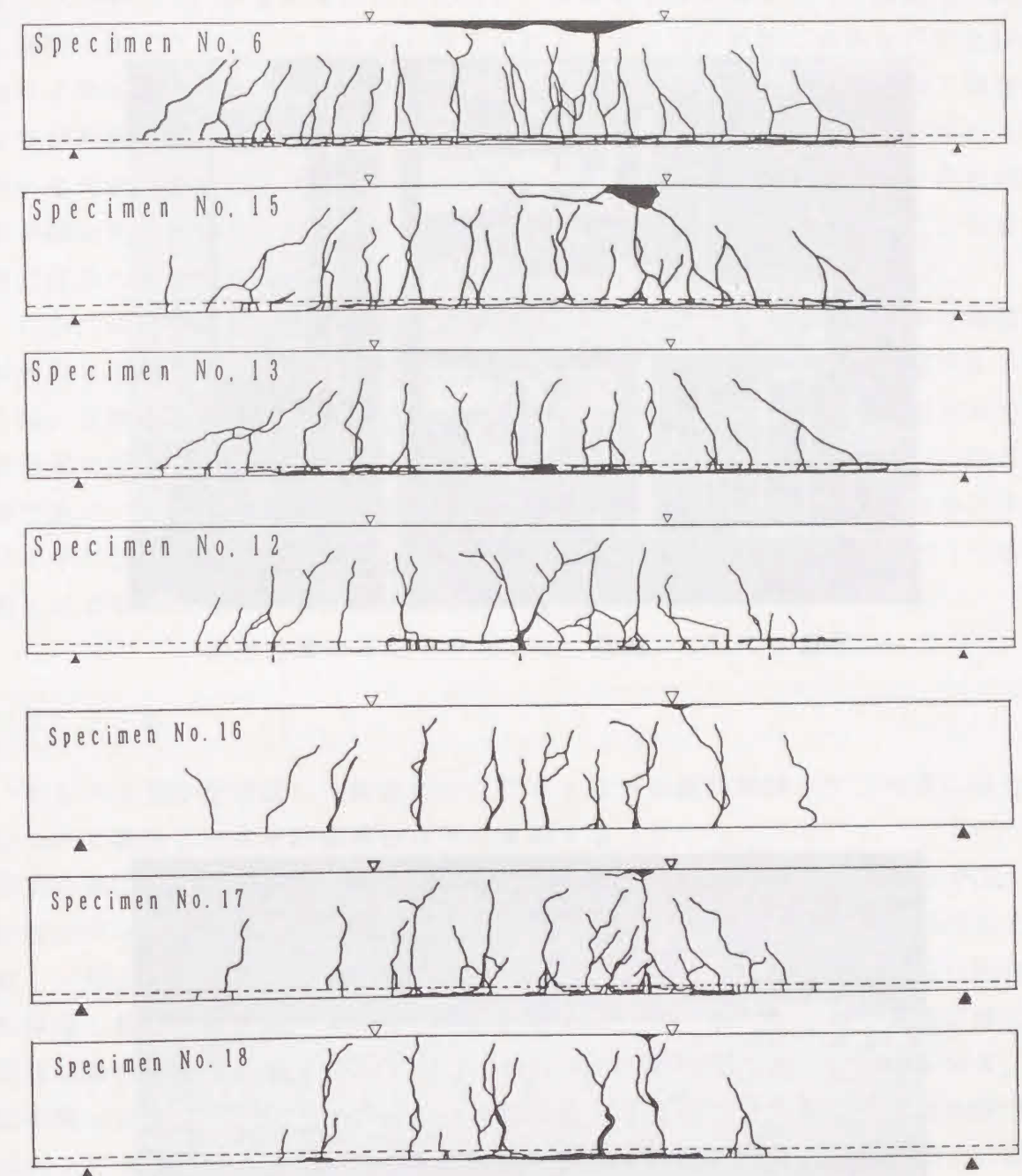


図-7.11 鉄筋コンクリートはりのひびわれ状況(2)

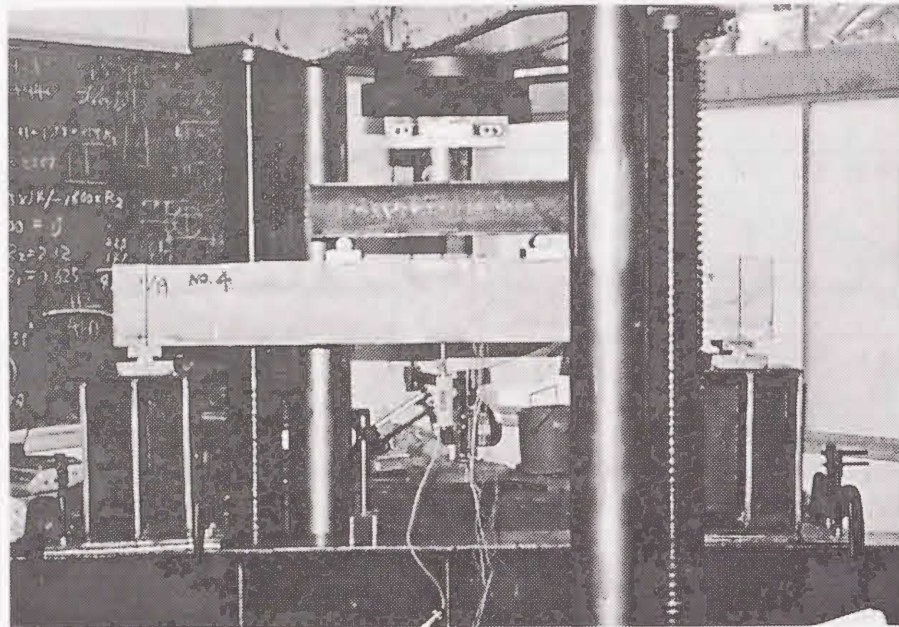


写真-7. 1 鉄筋コンクリートはりの载荷状況

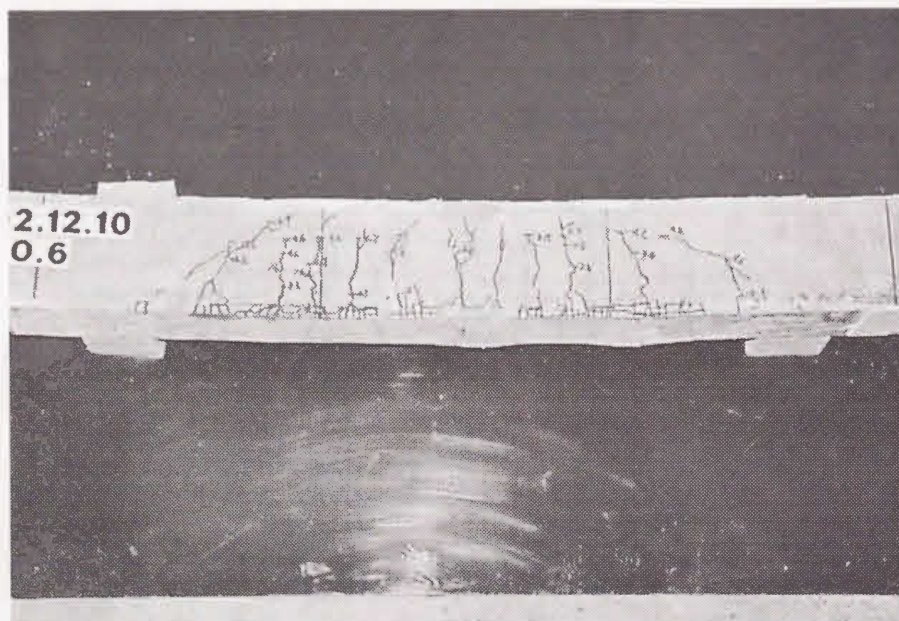


写真-7. 2 鉄筋コンクリートはりのひびわれ状況の一例

これは、前章での検討でも触れたが、ポリマーセメントモルタルの表面は非常に滑らかでコンクリートと接着しにくく、モルタルが若干軟らかい段階でのワイヤブラシがけで、非常に手間はかかるが、接合面全体が粗くなるのに加えて凹凸も適度に生じたことによるものと考えられる。接合面の処理に砕砂を用いた以外はワイヤブラシ処理と同じ条件としたはり（No.6）のひびわれ状況では、接合面にひびわれが生じている。これは、前章での結果にもあるが、砕砂の付着していないモルタル部分が非常に滑らかでコンクリートと接着しにくいこと、砕砂は粒子が細かくて軽いためモルタルの接合面に埋込む作業の管理が難しく、付着状況にばらつきを生じやすいことなどが原因と考えられる。

なお、砕砂や碎石による接合面処理では、平打ち成形法でのモルタル型枠製造が原則となるため、工場生産性の上から有利といえる縦打ち成形法を採用する場合は、平板を縦打ちで作製した後で砕砂や碎石をポリマーセメントモルタルや樹脂などで接着させる2層打ちとなるが、この場合には接合層で高い遮へい性が期待でき、コンクリート構造物の耐久性改善に有利となることも考えられる。また、ワイヤブラシがけは、実用性の面で改良の余地が多く、ショットブラストや洗出しによる処理を考える必要があるといえる。

（3）まとめ

モルタル型枠を埋設した鉄筋コンクリートはりの载荷試験より、両者の接合性について調査した本検討結果を以下に要約する。

- ①接合面に処理を施さないモルタル板を埋設した鉄筋コンクリートはりでは、主鉄筋ひずみ 1500μ での繰返し载荷中に剥離が進行し始めるが、 $2.5\sim 5\text{mm}$ 砕砂を散布して埋込んだモルタル板の場合、主鉄筋が降伏に達しない段階での数10回程度の繰返し载荷では剥離せずにモルタル板と鉄筋コンクリートとの一体性が保たれ、主鉄筋降伏後生じた接合面に沿うひびわれはたわみの急増とともに進展する。
- ②鉄筋コンクリートはりでのモルタル埋設板と現場打ちコンクリートとの接合性の向上には、細砂よりも粗砂による突起の形成が適しており、細砂の場合には使用量を増すことが必要で、ワイヤブラシによる接合面全体にわたる粗面化も接合性に非常に有効となる。

7. 4 曲げ性状とせん断性状

(1) 序説

ガラス繊維メッシュやSA系水性ポリマーディスパージョンには、モルタルのひびわれ抵抗性、靱性、諸強度、耐久性などを大きく向上させる優れた性能があることはすでに調査済みであるが、ここでは、これらの材料を用いたモルタル板の実用化を目的として、鉄筋コンクリートはりに埋設した場合のはりの曲げ性状およびせん断性状から、モルタル板を埋設することの有効性を検討することとした。

本実験の要因としては、モルタル板のポリマー結合材比、エポキシ系樹脂結合ガラス繊維メッシュ積層枚数、接合面処理、主鉄筋量などを取り上げた。

また、永久埋設型枠では、工場での製造、現場への輸送、現場での組立てなどでの作業性から、型枠の寸法に制限を設ける必要があり、実際の現場では型枠同士を突き合わせて継目を設けなければならない、はりとしての耐力やひびわれ性状などに大きな影響を及ぼすことが予想できる。そこで、鉄筋コンクリートはり引張側下面に埋設するモルタル板を4等分して4枚使用し、はりの長軸方向に3か所の継目を設けてその影響も検討することとした。

さらに、通常の鉄筋コンクリートはりの設計では、安全性や経済性などから曲げ引張り破壊を優先させるが、部材の寸法、位置、拘束状態などの他、地震などの偶発荷重によって、破壊の進行が急激で靱性に欠け、予知も難しく、構造物やその利用者に致命的な被害をもたらしやすいせん断破壊を生じることがある。そこで、せん断破壊に対するモルタル埋設板の使用効果についても、せん断破壊を先行させるようにせん断スパンと有効高さとの比を変えて調査した。

(2) 実験の結果と考察

1) 曲げ性状に及ぼすメッシュとポリマーの効果

鉄筋コンクリートはりの曲げ載荷試験で得られたひびわれ発生荷重と最大耐力結果を示した図-7. 12より、メッシュを積層したポリマーセメントモルタル型枠板を埋設した鉄筋コンクリートはりでは、モルタル型枠を用いない同寸法のはり(No. 1)と比較し、曲げひびわれ発生荷重が2倍程度に増大し、最大曲げ耐力も5~15%程度高くなることがわかる。とくに、メッシュの積層枚数が0枚のNo. 1, 2枚のグループのNo. 2~No. 6, および4枚のグループのNo. 7~No. 11の3者を比較すると、曲げひびわれ発生荷重や最大曲げ耐力の向上にメッシュ使用数の増加が大きく影響することがわかる。また、ポリマー結合材比が0.00のNo. 14(ポリ

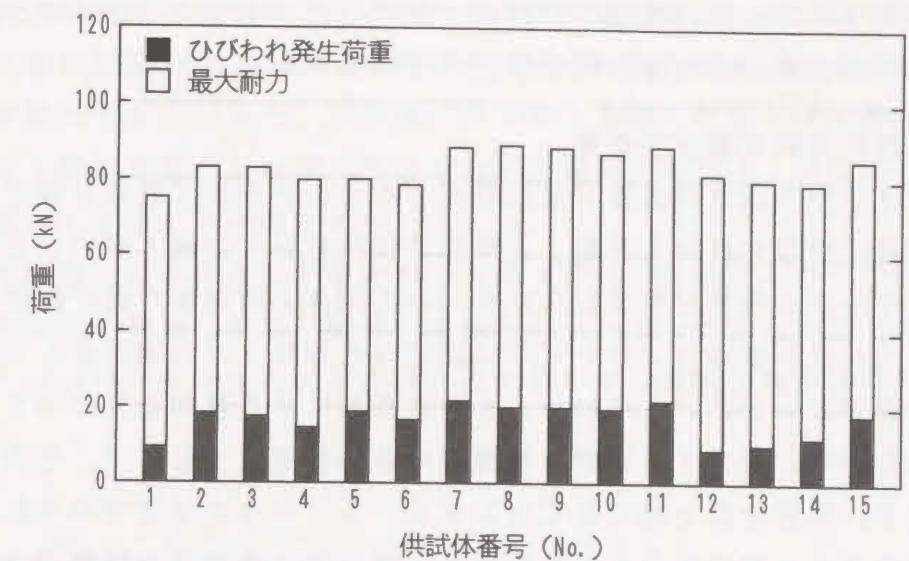


図-7. 12 鉄筋コンクリートはりのひびわれ発生荷重と最大耐力

マーなし) とこの比が0.10の No. 15との比較では、ポリマーの使用についても曲げひびわれ発生荷重や最大曲げ耐力の増進に有効といえる。

このように、メッシュを配したポリマーセメントモルタル板のはり引張下縁への埋設が、鉄筋コンクリートのひびわれ抵抗性の改善や耐力の向上に有効となるのは、有効高さが120mmと部材断面が小さいこともあるが、メッシュの補強効果およびポリマーの使用によるモルタルの付着力、引張強度、靱性などの改善効果によるといえる。

載荷試験では、主鉄筋の降伏が進行すると、ガラス繊維メッシュを構成するはり長軸方向の繊維束(糸)が延び能力の許容値を越えて次々と破断し始め、これにともなってメッシュ外層にある数mm厚のかぶりモルタル薄片が剥落を起こす。しかし、剥落音、剥落するモルタル片の寸法や量などは、メッシュ積層枚数の増加によって小さくなるので、第三者影響度としては小さく、逆に破壊の危険予知や破壊の進行状態調査にこれらの現象が利用可能と考えられる。

また、ひびわれ状況を示した図-7. 10および図-7. 11からわかるように、鉄筋コンクリート本体のひびわれが、モルタル板のところで数本に枝分かれしており、モルタル表面のひびわれ幅が非常に小さくなることがわかる。これらは、メッシュを使用したことによるひびわれ分散効果によるものといえる。また、ポリマーの使用でモルタルの延び能力も高まっており、はり引張下縁に生じるひびわれはより幅が狭くなるので、鉄筋コンクリートの耐久性向上には有利となる。

なお、本章での実験では、供試体寸法などを考慮してメッシュサイズが5.2mmと比較的目の詰まったメッシュを使用したためか、ひびわれ状況を示した図からもわかるように、はりのたわみの増大にともなってメッシュに沿ったひびわれが

観察できるようになった。前章での検討で使用したようなメッシュサイズが12.5 mm程度と多少目の粗いものの使用を検討する必要があるといえる。

2) 曲げ性状に及ぼす継目の影響

鉄筋コンクリートはりの引張下縁に埋設するモルタル板に継目を設けた No. 12 の供試体では、ひびわれ発生荷重、主鉄筋降伏荷重および最大耐力などを総合的にみると、モルタル型枠を埋設しないNo. 1の供試体と同程度の曲げ耐荷性状を有しており、モルタル板はコンクリートにおけるその厚さ分の働きをしているのでその補強効果がないとはいえないが、モルタル板による補強効果は小さいといえる。このことから、モルタル型枠を補強用の有効断面とするには、その配置を千鳥形としたり、形状を長方形でなくコンクリートブロックなどでみられるような交互にかみ合うことのできるものとし、継目用の連結具を開発するなどの検討が必要になるといえる。

また、ひびわれ状況をみると、継目を表す矢印の位置でひびわれ幅が大きくなっていることがわかり、耐久性を考えると、埋設板に生じるひびわれをできるだけ少なくするように継目間隔を選定し、継目にはシリコン樹脂充てん材やプチルゴムテープなどで遮へい性とひびわれ追随性をもたせることが重要となる¹¹⁹⁾。

3) 曲げ性状に及ぼす鉄筋量の影響

主鉄筋に D10を2本あるいは1本使用した鉄筋コンクリートはりのNo. 16～No. 18から得られた結果より、鉄筋コンクリート単体と比べてモルタル板を埋設したものでは、はりの最大耐力や主鉄筋降伏荷重が多少上昇し、ひびわれ発生荷重では、鉄筋量が同じはりで約10kN増加し、鉄筋量が半分のはりでも6 kN程度高くなっており、主鉄筋量の少ない鉄筋コンクリートはりでは、その引張縁への連続繊維補強ポリマーセメントモルタル板の埋設が、曲げひびわれ発生荷重の改善にきわめて有効といえる。

また、ひびわれ状況の図などでは、主鉄筋量が少なく曲げ剛性が小さい場合、ひびわれの本数が少なくなってひびわれ幅が大きくなるため、破壊が進行した状況では、モルタル板とコンクリートとの接合面での剥離がほとんど起きていないので付着性は高いといえるが、ひびわれ面でのメッシュの破断やかぶりモルタルの剥落などが顕著となることがわかる。

4) セン断性状

スターラップを使用せずにセン断スパン有効高さ比を2とした鉄筋コンクリートはりでは、モルタル板を用いないNo. 20およびモルタル板を埋設したNo. 21の試験結果より、モルタル板の埋設で最大耐力が14kN程度上昇し、ひびわれ発生荷重も約10kN増加することがわかる。また、モルタル板を用いないはりでは最大荷重に

達した直後に急激に荷重が低下するが、モルタル板を埋設したはりでは最大荷重に達した後も高い耐力をしばらく保持でき、はりの靱性改善にモルタル板の埋設が非常に有効であるといえる。これは、メッシュを配したモルタル板の耐荷性能が高く、せん断力で生じるひずみやひびわれの抑制に有効で、コンクリートとの接合性も高いことによる証拠とえる。

なお、本実験ではモルタル平板を曲げ引張下縁にのみ埋設したが、はりの側面にもモルタル板を埋設したり、凹形一体成形のモルタル型枠を作製してこの内部に現場打ちコンクリートを打設すれば、より高いせん断抵抗性が得られるものと期待できる。

(3) まとめ

モルタル型枠を埋設した小型の鉄筋コンクリートはりの載荷試験より、はりの曲げ性状やせん断性状について調査した本検討結果を以下に要約する。

①鉄筋コンクリートはりの曲げひびわれ発生荷重や曲げ耐力の向上には、メッシュを配したモルタル板をはりの引張縁に埋設するのが有効となる。

②鉄筋コンクリートはりの曲げひびわれ発生荷重の増進、ひびわれ幅の抑制、メッシュ外層のかぶりモルタルの剥落防止などには、SA系ポリマーセメントモルタル板をはりの引張縁に埋設するのが有効となる。

③鉄筋コンクリートの引張縁に埋設するモルタル板を複数枚並べて継目をつくると、メッシュやポリマーによる補強効果やひびわれ抑制効果などが十分発揮されず、継目に生じるひびわれ幅も大きくなるので、埋設型枠の形状や配置、連結具の設置などに何らかの対策を要し、遮へい性やひびわれ追随性のある継目処理も必要となる。

④主鉄筋量の少ない鉄筋コンクリートはりでは、連続繊維補強ポリマーセメントモルタル板をはり引張縁に埋設すると曲げひびわれ発生荷重が高まるが、ひびわれ本数が少なくてひびわれ幅も大きくなるために、破壊が進行した状況では、モルタル板とコンクリートとの接合性は比較的良いにもかかわらず、メッシュの破断やメッシュのかぶりモルタルの剥落などが顕著となる。

⑤せん断破壊型鉄筋コンクリートはりの初期ひびわれ発生荷重、最大耐力、最大耐力後の靱性などの改善には、連続繊維補強ポリマーセメントモルタル板をはりの引張縁に埋設するのがきわめて有効となる。

⑥鉄筋コンクリートはりの主鉄筋が降伏してたわみが急増すると、はりの引張縁埋設したモルタル板のガラス繊維メッシュを構成する繊維束が次々と破断し始めるが、その破断音、剥落するかぶりモルタルの寸法や量などは、メッシュ積層枚数の増加によって小さくなり、破壊の危険予知や進行状態調査にこれらの利用が

考えられる。

⑦鉄筋コンクリートはりの引張縁にできるひびわれ幅の抑制には、メッシュで補強したポリマーセメントモルタル板の埋設が有効となるが、目の詰まったメッシュを使用すると、はりの変形が進行するのにもなってモルタル板内でメッシュの剥離によるひびわれが生じる。

7. 5 総括

エポキシ樹脂で結合したガラス繊維メッシュやSA系水性ポリマーディスパージョンを用い、現場打ちコンクリートとの接合面に砕砂を散布して埋込んだ10mm厚セメントモルタル板を、小型の鉄筋コンクリートはりの引張縁に埋設して載荷試験を行った本章での検討事項より、得られた主要な結果を以下に要約する。

①接合面に処理を施さないモルタル板を埋設した鉄筋コンクリートはりでは、主鉄筋が降伏しない状態での繰返し載荷中に接合面での剥離が進展するが、モルタル埋設板の断面に応じて粒径の大きな砕砂をその接合面に埋込んで突起を設けたり、ワイヤブラシで接合面全体を粗くすることで、主鉄筋が降伏するまではモルタルとコンクリートとの接合面にひびわれは起きず、良好な接合性が得られる。

②メッシュとポリマーとを併用したモルタル板は、鉄筋コンクリートはりの初期ひびわれ発生荷重、曲げ耐力、せん断耐力、靱性などの改善に有効で、とくに主鉄筋量の少ないはりのひびわれ発生荷重やせん断破壊形式をとるはりの靱性の改善効果が高い。

③鉄筋コンクリートに埋設するモルタル板を複数枚並べて継目をつくると、メッシュやポリマーによる補強効果やひびわれ抑制効果などが十分発揮されず、継目に生じるひびわれ幅も大きくなるので、埋設型枠の形状や配置、連結具の設置などに何らかの対策を要し、遮へい性やひびわれ追従性のある継目処理も必要となる。

④鉄筋コンクリートはりの主鉄筋が降伏してたわみが急増すると、はりの引張縁埋設したモルタル板のガラス繊維メッシュを構成する繊維束が次々と破断し始めるが、その破断音、剥落するかぶりモルタルの寸法や量などは、メッシュ積層枚数の増加によって小さくなり、破壊の危険予知や進行状態調査にこれらの利用が考えられる。

⑤メッシュで補強したポリマーセメントモルタル板を埋設した鉄筋コンクリートはりでは、ひびわれが分散してひびわれ幅が小さくなるが、目の詰まったメッシュを使用すると、はりの変形が進行するのにもなってモルタル板内でメッシュの剥離によるひびわれが生じる。

第8章 結 論

本研究は、地球環境問題となっている熱帯材合板からのコンクリート用型枠材料の転換、工場製品の導入や型枠工事、養生、表面仕上げなどの工程簡素化による現場施工の合理化、建設廃材や仮設材の削減、ち密でひびわれが生じにくく、着色や模様化も可能な表層を設けることによるコンクリート構造物の耐久性や美観の向上、環境資源である天然砂の保全や産業副産物の有効利用などを目的とした高機能永久埋設型枠の開発に関するものである。

永久埋設型枠は、型枠としての機能後も取り外さずにコンクリート構造部材の表層に埋設し、構造物の耐久性を高めるもので、本研究では、連続繊維メッシュ補強材と水性ポリマーディスパージョン改質材などの比較的新しい素材やフェロニッケルスラグ砂などの副産物をセメントモルタルに利用し、経済的で成形しやすく、高機能で汎用性に富む永久埋設型枠製品を製造し、これを従来からの現場打ちコンクリートと複合化させた新しい工法として定着させるための学術的な基礎資料を得るため、次のような実験を行って考察を加えている。

実験では、様々なポリマーやメッシュ、および数種のセメントや骨材を使用したモルタルの諸性状を調査するとともに、モルタルの加熱による促進養生効果、現場打ちコンクリートとの接合面に色々な突起を設けたモルタルと現場打ちコンクリートとの一体性、モルタル型枠を埋設した小型の鉄筋コンクリートはりの載荷性状などの検討を行っている。

本研究で得られた主要な結果を以下に要約する。

- (1) PAE系、EVA系、SBR系およびSA系のセメント混和用水性ポリマーディスパージョンを0.1程度のポリマー結合材比で使用する高流動モルタルは、通常のセメントモルタルと同様な練りまぜ方法で十分に製造可能であるが、不安定な空気泡が多量に連行されるため、界面活性剤系、シリコン系などの消泡剤を利用してこれを抑制することが大切となり、その効果は界面活性剤系の消泡剤が最も高い。
- (2) セメント混和用水性ポリマーディスパージョンの使用で、モルタルの流動性、材料分離抵抗性、引張強度、乾燥収縮低減性、靱性、耐摩耗性、気密性、遮塩性、炭酸化抵抗性、耐硫酸塩性などが向上するが、耐酸性、熱膨張性、耐凍害性などは同程度で、一般的なSBR系、EVA系およびPAE系のポリマーでは、初期材齢や湿潤養生での諸強度発現性や圧縮強度が低下する。
- (3) SA系ポリマーは、一般的なSBR系、EVA系およびPAE系のポリマーあるいは

ポリマー系減水剤に比べ、最低造膜温度が高く安定で、細孔の充てんや凝集、一部造膜化などにより、モルタルの流動性、圧縮強度、引張強度、曲げ強度などの改善効果が高まるばかりでなく、コンクリートと比較して、耐凍害性や耐酸性などは同程度であるが、耐衝撃性、耐摩耗性、気密性、遮塩性、耐硫酸塩性などが非常に優れており、初期材齢や湿潤養生での諸強度発現性や圧縮強度の増進効果も良好で、永久型枠用モルタルへの利用に適する。

- (4) 強硬で細粒の産業副産物であるフェロニッケルスラグ砂は、天然砂や砕砂に比べ、モルタルの材料分離を生じやすく、通常のコンクリートには使用しにくいですが、材料分離抑制効果の高いポリマーを使用して平打ち成形による薄肉永久埋設型枠用モルタルでは利用価値が大きく、流動性、圧縮強度、引張強度、曲げ強度、耐衝撃性、耐摩耗性、遮塩性、炭酸化抵抗性などを大きく改善する。
- (5) セメントモルタルの流動性、材料分離抵抗性、接着性、ち密性などを改善するポリマーや彩色面で応用の利くガラス繊維メッシュを併用したモルタルは、表面が滑らで、着色材や化粧材の使用や表面の模様化なども容易となるので、構造物の景観改善に利用価値が高い。
- (6) 連続繊維メッシュを使用したモルタル板やガラス繊維メッシュの引張試験では、酸やアルカリで粗面処理したアルミニウム板とエポキシ系接着剤とを用い、モルタル板やメッシュの供試体を補強する方法が有効である。
- (7) 連続繊維メッシュは、モルタルの初期ひびわれ発生後の耐力や耐衝撃性の改善にきわめて有効で、気密性や乾燥収縮の改善効果もあり、剛性の高いガラス繊維や炭素繊維では、引張強度、曲げ強度、ひびわれ抵抗性などの改善、剛性の低いビニロン繊維では、伸び能力、耐衝撃性などの改善効果が非常に高い。
- (8) メッシュで補強したポリマーセメントモルタルの引張応力とひずみとの関係は、ひびわれ発生まで続くメッシュとモルタルとが一体となって外力に抵抗する区間、ひびわれが多発する区間およびメッシュのみで外力に抵抗してひびわれ幅が拡大する区間の3領域に分けられ、メッシュを増やすと初期ひびわれ発生以後の耐力が増大してひびわれ間隔が小さくなり、ポリマーの使用で初期ひびわれ発生時の応力やひずみが増加してひびわれ間隔が大きくなり、付着弾性モデルに似たひびわれ多発区間での応力増加の現象を示す。
- (9) モルタルに引張応力や曲げ応力が作用した場合の強度や靱性の改善には、補強用メッシュの繊維束を細くして間隔を狭めるのが有効だが、メッシュ構成を決める場合には、補強効果に加えて、モルタル板の成形性、モルタルとの付着性、耐火性などを考慮する必要がある。
- (10) アルカリ劣化を生じるEガラス繊維メッシュをエポキシ樹脂系結合材で熱や圧力で含浸処理したメッシュは、アルカリ水溶液に浸漬しても引張耐力が低下せず、ビニロン繊維メッシュも、吸水現象を起こして軟化はするが、アルカリ

水溶液に浸漬しても引張耐力はほとんど低下しない。

- (11) 耐アルカリガラス繊維は、アルカリ水溶液に浸漬すると徐々に引張耐力が低下するが、カチオン形PAE系ポリマーディスパージョンによる簡便な浸漬乾燥処理は、耐アルカリガラス繊維メッシュのアルカリ劣化の抑制に有効で、メッシュの結合力も高まり、イオン交換水などによるディスパージョンの希釈倍率や浸漬乾燥処理回数で、メッシュに付着するポリマー量を自由に操作できる利点もある。
- (12) モルタル成形直後に行う最高温度65℃程度の蒸気養生は、ポリマーセメントモルタルの材齢1日程度の初期強度発現に有効であるが、その後の強度増進はあまり期待できないので、高品質が要求されるモルタルには採用を抑えるのが良い。
- (13) ポリマーセメントモルタルでは、材齢7日程度までの初期湿潤養生後に行う乾燥養生が品質向上に不可欠となるが、これを促進させる最高温度100℃程度の熱乾燥養生は、モルタルの引張強度、曲げ強度および圧縮強度を増進させるものの耐凍害性などの耐久性を損なう恐れがあり、高耐久性を要するモルタルには適さない。
- (14) 早強ポルトランドセメントの使用は、初期材齢での強度発現性に問題のあるポリマーセメントモルタルの初期強度の増進に非常に有効である。
- (15) 走査電子顕微鏡観察は、ポリマーセメントモルタルや連続繊維メッシュの性状評価に非常に有益な情報を提供するが、感温性の高いポリマーを使用したモルタルやメッシュの観察では、試料の乾燥に注意し、弱めの電流で白金-パラジウムなどによる導電性処理を施し、2次電子像観測時の電子線照射にも注意を要する。
- (16) ポリマーセメントモルタル製の埋設板は表面が非常に滑らかなために、現場打ちコンクリートとの接合面に付着性を高める処理を施さない場合は、その接合面におけるせん断強度や引張強度はほとんどなく、接合面に砕砂・碎石や溝状・千鳥状の凹凸で突起を設けた場合には、コンクリート単体の数分の1程度のせん断強度や引張強度を確保でき、最大応力後の耐力もかなり高いので、接合性は比較的良いといえる。
- (17) 2面せん断試験や割裂引張試験の場合、縦打ち成形でも平打ち成形でも作製可能な凹凸形状転写よりも、平打ち成形法が原則となる砕砂・碎石を埋込んだ突起を埋設モルタルの接合面に設けるのが有効で、モルタルの断面寸法やメッシュの配置などを考慮した上で、砕砂・碎石の粒径を大きくして散布量を多くすると、現場打ちコンクリートとの接合性が高まる。
- (18) モルタル埋設板の接合面への凹凸形状転写法は、独立千鳥状よりも連続溝状とし、その突起断面を長方形とすると、現場打ちコンクリートとの接合面での

せん断強度や引張強度およびモルタル板の成形性から有利となり、せん断強度はモルタル突起の断面積が大きいほど高くなり、割裂引張強度は寸法自体が大きくてコンクリートに食い込む逆台形型断面の突起を有するモルタルが高い。

(19) 薄肉のモルタル埋設板と現場打ちする鉄筋コンクリートとの接合性には、モルタル板の断面寸法やメッシュの配置を配慮した上で、その接合面に寸法の大きな砕砂を散布して埋込む処理が有効で、粒径の比較的小さな砕砂では散布量を増して接合面全体を覆うことが必要で、プラスチックな状態のモルタル面をワイヤブラシで粗面化する方法でも、主鉄筋が降伏するまではモルタル板とコンクリートとの接合面にひびわれが生じない。

(20) メッシュとポリマーとを併用したモルタル板は、小型の鉄筋コンクリートはりの初期ひびわれ発生荷重、曲げ耐力、せん断耐力、靱性などの改善に有効で、とくに主鉄筋量の少ないはりのひびわれ発生荷重やせん断破壊形式となるはりの靱性を改善する効果が高い。

(21) 鉄筋コンクリートはりに埋設するモルタル板を列べて継目をつくると、メッシュやポリマーの使用による補強効果やひびわれ抑制効果などが十分発揮されず、継目に生じるひびわれの幅が大きくなるので、埋設型枠の形状や配置、連結具の設置などに対策を要し、遮へい性やひびわれ追従性の高い継目処理も必要となる。

(22) メッシュとポリマーとを併用して作製したモルタル板を埋設した鉄筋コンクリートはりでは、主鉄筋の降伏が進行してたわみが増大すると、メッシュを構成するガラス繊維束の破断が音を伴って次々と生じ、メッシュ外層の数mm厚のかぶりモルタルも微小片で剥落するので、破壊の危険予知や進行状態調査にこれらの利用が考えられる。

(23) 鉄筋コンクリートはりにメッシュで補強したポリマーセメントモルタル板を埋設すると、メッシュによるひびわれ分散効果やポリマーによる靱性改善などで、ひびわれ幅が小さくなるが、目の詰まったメッシュを使用するとはりの変形が進行にともなってメッシュに沿ったひびわれが生じるので、メッシュサイズの選定には注意を要する。

以上より、次のようなことがいえる。鉄筋コンクリート構造部材に埋設する永久型枠には、SA系水性ポリマーディスパージョン、フェロニッケルスラグ砂、早強ポルトランドセメント、界面活性型消泡剤などを使用した高流動モルタルを、エポキシ樹脂による熱圧含浸処理あるいはPAE系水性ポリマーディスパージョンによる簡便な浸漬乾燥処理を施し、耐アルカリ性や結合力を高めたガラス繊維メッシュで補強するのが良い。これらの材料を用いることで、モルタルの諸物性、耐久性、美観などが大きく改善される。このようなモルタルでは、湿潤養生後の

乾燥養生で品質が向上し、早期材齢強度を改善するには、長期強度や耐久性に一部問題があるものの、蒸気養生や熱乾燥養生などの促進養生が有効となる。メッシュやモルタルの性状評価には、物性や耐久性などに関する従来の試験に加えて走査電子顕微鏡観察などが有効となる。砕砂や碎石を埋込んだり、溝状や千鳥状の凹凸を転写したり、ワイヤブラシがけなどで接合面を処理したモルタル板をコンクリートに埋設すると、接合面に2面せん断応力や割裂引張応力が作用しても比較的高い耐力を保持できる。小断面の鉄筋コンクリートはりは、接合面を砕砂で処理した連続繊維補強ポリマーセメントモルタルの埋設で、良好な一体性が確保でき、ひびわれ発生荷重が上昇してひびわれ幅が抑制され、曲げ耐力、せん断耐力および靱性の改善効果もある。

耐力、遮へい性、美観などに優れた連続繊維補強ポリマーセメントモルタルは、永久埋設型枠にとどまらず、遮へい施設、修景材、各種の建設資材などにも適用可能となる。コンクリート構造物の劣化や老朽化に加えて、阪神大震災などの災害で注目されている補修・補強材料、新幹線や高速道路などの整備や高層建築物の増加に伴って需要の増えている防音壁や落下防止壁などの付帯施設、排出量の急増とともに早急な対策を必要としている石炭灰などの副産物やごみ焼却灰をコンクリートに多量使用した場合の養生層、産業廃棄処理場の遮へい層、生態系にやさしいエココンクリートとして研究が進められているポーラスコンクリートの内部に使用する補強材、海底や地中、極寒地あるいは月面などでの建設資材など、様々な用途に可能性を秘めている多機能型建設材料といえるため、これらの適用性に関する研究も今後取り組むべき課題と考える。

永久埋設型枠は、コストや製造法、建設現場での組立てや接合などの技術、新たな設計法の確立など、実用化には解決すべき問題も多く、その形式にも様々なものが考えられる。しかし、永久埋設型枠を形状、寸法、品質などで規格化すれば、様々な建設現場に利用されるばかりでなく、回転率を高めるための型枠や養生に経費のかさむ製品工場や、建設工事現場近くのヤードで大型プレキャスト部材を作製する際の型枠としての使用も可能となり、膨大な需要が期待できる。

本研究と相前後して開発された個々に特徴のあるいくつかの型枠が、世紀の事業である本州四国連絡橋などで試験施工されているように、永久埋設型枠工法は、注目されつつある建設技術であり、多方面で研究や施工の実績を蓄積し、設計法や施工法が標準化されることを期待する。

単なる仮設材であった型枠が、耐久性や景観などを改善する機能材、現場打ちコンクリートを補強する構造材、様々な社会への貢献材などとして活用されることを願い、本研究がそれらの基礎的資料となれば幸いである。

謝 辞

本論文は、筆者が徳島大学工学部土木工学科コンクリート研究室に卒業研究生として配属されて以来、同大学院工学研究科修士課程土木工学専攻での学生研究および同大学工学部に助手として採用されてから阿南工業高等専門学校に移っての教官研究として、継続して行ってきた繊維補強コンクリート、製品用コンクリート、コンクリート用混和材料、コンクリート用骨材などに関する研究実績を基に、1989年度の文部省内地研究員として東京大学生産技術研究所で始めた連続繊維補強ポリマーセメントモルタルに関する研究を、その後も徳島大学と阿南工業高等専門学校との協力体制のもとで行い、その成果をとりまとめたものです。

本論文の主査をお願いしました徳島大学工学部建設工学科教授河野清博士には、学生時代からの研究はもとより公私にわたり一方ならぬお世話をいただき、感謝の至りにたえません。また、先見の明をもたれて素晴らしいテーマを与えていただいた元東京大学生産技術研究所教授（現千葉工業大学工学部教授）小林一輔博士には、心より感謝の意を表します。

論文をまとめるにあたっては、徳島大学工学部建設工学科教授水口裕之博士ならびに同学科教授平尾潔博士に副査の労をとっていただき、貴重なるご示唆を拝借いたしました。心より感謝いたします。

研究の課程では、徳島大学工学部建設工学科助教授の島弘博士および山中英生博士、同助手の三岩敬孝氏および上田隆雄氏、ならびに旧教官であった神原紀仁氏（現エイトコンサルタント勤務）、横井克則氏（現高知工業高等専門学校助手）および小川洋二氏（現秩父小野田勤務）より、あれこれとご助言をいただき、技官の石丸啓輔氏および松島晋氏にもいろいろとご無理を聞いていただきました。また、同大学大学院博士課程を修了された則武邦具博士、石井光裕博士および横田優博士、ならびに現在同課程に在籍中の川口修宏氏からも貴重なアドバイスを頂戴いたしました。皆様には深く感謝しております。

東京大学生産技術研究所での内地研究員時代には、魚本健人博士、白木亮司博士、星野富夫氏、西村次男氏をはじめとする小林・魚本研究室の方々から厳しくも暖かいご指導をいただきました。ここに厚くお礼申し上げます。

村本建設（株）、日本レヂボン（株）および旭コンクリート工業（株）の各社には、本研究をご理解くださり、ご支援をいただきました。深く謝意を表します。

本研究を遂行するにあたっては、東京大学生産技術研究所における芝浦工業大学土木工学科卒業研究生の山本敏君、徳島大学工学部建設工学科コンクリート研究室の大学院生筒崎卓君をはじめ、同大学大学院を修了された佐々木啓次君、森内誠司君および谷口拓也君、ならびに同学部を卒業された吉岡辰也君、森岡康秀君、殿井（旧姓森藤）直人君および浅井俊光君に大変なご協力をいただきました。皆様、ありがとうございます。

職場の阿南工業高等専門学校では、助教授天羽和夫氏を筆頭に、建設システム工学科教官の方々から激励され、事務官の多田孝氏および遠野竜翁氏、ならびに卒業生の岡久義行君、久保博君、小西裕之君、相原秀行君、井馬達也君、相原修司君、青木義典君、坂本真一君、西岡健君、矢野昭人君、山崎潤一君、西利明君、美馬由周君、石岡佳昭君、坂井一司君、狭間誠一君および藤川陽二君には実験などご助力いただきました。皆様に心より感謝する次第です。

また、妻の里佳ならびに本研究半ばで生まれた長男の紀彰と長女の佳穂には、大変迷惑をかけましたが、本論文をどうにか作成することができました。どうもありがとう。

最後に、皆々様のご多幸と益々のご活躍をお祈りし、感謝の言葉といたします。

1996年9月

堀井克章

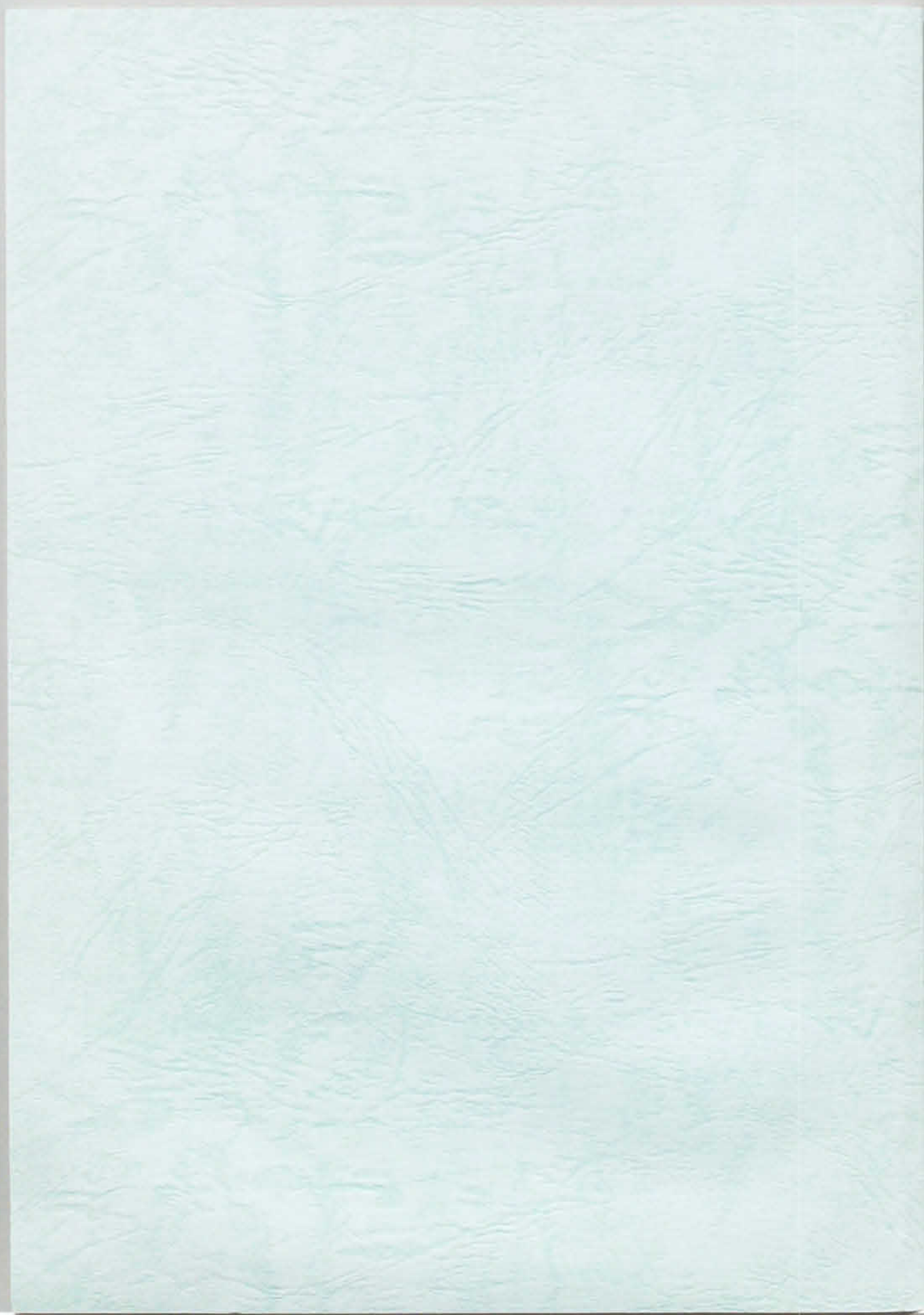
参 考 文 献

- 1) 産業技術会議；産業とフロンティア技術－独創的技術の革新を目指して－，産業技術会議，pp. 727~773，1996。
- 2) 地球環境データブック編集委員会；ひと目でわかる地球環境データブック，オーム社，pp. 57~100・213~219・275~287・365~453，1993。
- 3) 毎日新聞（日刊），8/23，1996。
- 4) トーマス・オニール，他；ニューギニアの秘境イリアン・ジャヤ，ナショナルジオグラフィック日本版，Vol. 2，No. 2，pp. 28~59・付録地図，1996。
- 5) 宮脇昭；森林の破壊と再生，土木学会誌（別冊増刊），Vol. 79-5，pp. 90~93，1994。
- 6) 酒井寛二；熱帯林減少と型枠材料転換，土木学会誌（別冊増刊），Vol. 79-5，pp. 94~95，1994。
- 7) 谷口英武，他；熱帯雨林保護のための型わく工事，コンクリート工学，Vol. 30，No. 12，1992。
- 8) エルンスト・U・フォン・ワイツゼッカー（宮本憲一，他訳）；地球環境政策，有斐閣，pp. 3~17・58~64・288~302，1994。
- 9) 本間慎；データガイド地球環境，青木書店，pp. 2~59・104~109・248~259，1994。
- 10) 白田利勝；炭酸ガス問題に関する国の取り組みと研究課題，セメント・コンクリート，No. 530，pp. 1~8，1991。
- 11) メディア・インターフェイス；地球環境情報1994「新聞記事データベース」，ダイヤモンド社，pp. 1~126・201~384，1994。
- 12) 建設通信新聞（日刊第二部），5/31，1995。
- 13) 建設通信新聞（日刊），10/3（1994），8/2・8/29（1996）。
- 14) 松井雅志；建設現場の改革，コンクリート工学，Vol. 34，No. 1，pp. 38~39，1996。
- 15) 西村隆司，他；（特集）現場でゆとりを生む方法，日経コンストラクション，No. 99，pp. 16~36，1993。
- 16) 日本経済新聞（日刊），8/31，1996。
- 17) 佐藤嘉剛；働く人が生涯を託せる産業として建設業の社会的役割や貢献度をより若い世代に知って欲しいのです，NEX-US，Vol. 4，No. 8，pp. 1~4，1995。
- 18) 小林一輔；コンクリート構造物の早期劣化と耐久性診断，森北出版，pp. 1~226，1991。
- 19) セメント・コンクリート編集委員会，他；特集・コンクリート製型枠，セメント・コンクリート，No. 582，pp. 2~155，1995。
- 20) 吉野次彦；型枠工法，コンクリート工学，Vol. 33，No. 3，pp. 93~96，1995。
- 21) 中根淳，他；プレキャスト（PCa）型枠工法の現状，コンクリート工学，Vol. 33，No. 4，pp. 25~34，1995。
- 22) 小川晴果；打込み型枠工法，建築技術，No. 1990-7，pp. 130~136，1990。
- 23) 高田博尾；型わく・志保工の合理化，コンクリート工学，Vol. 30，No. 6，pp. 94~100，1992。
- 24) 酒井寛二，他；資源問題から型枠を考える，セメント・コンクリート，No. 556，pp. 8~13，1995。
- 25) 片脇清士；新しい土木材料とその展開，山海堂，pp. 119~121，1995。
- 26) 大成建設，他；ポリマー含浸コンクリートによる高耐久性埋設型枠材，民間開発建設技術の技術審査・証明事業認定規程に基づく土木系材料技術・技術審査証明報告書，pp. 2~87，1990。
- 27) 小野武彦，他；熱帯材型枠の代替に関する研究，第48回セメント技術大会講演集，pp. 936~941，1994。
- 28) 日本建設情報総合センター；民間開発建設技術審査証明技術のご紹介，JACIC情報，Vol.

- 10, No. 3, pp. 72~73, 1995.
- 29) 日経コンストラクション, 最新土木工法年鑑95, pp. 196~200, 日経BP社, 1995.
- 30) 西村隆司, 他; 特集・土木工法'93, 日経コンストラクション, No. 88, pp. 26~83, 1993.
- 31) 西村隆司, 他; 特集・土木工法'94, 日経コンストラクション, No. 112, pp. 26~83, 1994.
- 32) 西村隆司, 他; 特集・土木工法95, 日経コンストラクション, No. 136, pp. 44~103, 1995.
- 33) 西村隆司, 他; 特集・土木工法96, 日経コンストラクション, No. 160, pp. 50~99, 1996.
- 34) 清水建設, 他; 耐久性に優れた埋設型枠を開発, NEX-US, Vol. 3, No. 9, pp. 29, 1994.
- 35) 日本コンクリート工学協会; 海洋コンクリート構造物の防食指針 (案) - 改訂版 -, 日本コンクリート工学協会, pp. 32~34・pp. 101~110, 1990.
- 36) 日刊建設工業新聞 (日刊), 特集・建設業は地球蘇生産業「環境との共生めざすわが社の蓄積技術」, 7/1・7/19・8/5・8/17・9/24・9/30・12/7, 1993.
- 37) 建設通信新聞 (日刊), 4/15・6/2・6/3・7/23・8/18, 1993.
- 38) 建設通信新聞 (日刊), 5/25・6/14・6/15・6/17・6/23・7/5・7/19・7/29・8/3・8/9・8/22・8/31・9/7・9/9・10/3, 1994.
- 39) 建設通信新聞 (日刊), 1/12・2/1・3/24・4/25・3/20・6/28・7/25・8/4・11/20, 1995.
- 40) 建設通信新聞 (日刊), 1/12・1/23・3/27・4/3・5/21・6/27・6/28・7/15, 1996.
- 41) 青山實伸; 道路橋における塩害対策, コンクリート工学, Vol. 25, No. 11, pp. 74~79, 1987.
- 42) 小林一輔, 他; 各種セメント系材料の酸素の拡散性状に関する研究, コンクリート工学, Vol. 24, No. 12, pp. 91~106, 1986.
- 43) 例えば, 堀井克章; ビニロン繊維ネットで補強したポリマーセメントモルタル板の基礎的物性, 土木学会第45回年次学術講演会講演概要集第5部, pp. 832~833, 1990.
- 44) 堀井克章, 他; 連続繊維ネットとポリマー混和材を用いたモルタル板の諸性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 15, No. 1, pp. 1017~1022, 1993.
- 45) 川口修宏, 他; ガラス繊維とポリマーを用いた埋設型わくの基礎的性質とコンクリートとの付着性状, セメント・コンクリート論文集, No. 48, pp. 802~807, 1994.
- 46) 堀井克章, 他; 各種の砂を用いた永久型枠用繊維補強ポリマーセメントモルタルの性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 17, No. 2, pp. 83~88, 1995.
- 47) Horii, K. et al; Experimental Studies on Various Fiber Nets Polymer Dispersions and Aggregates Used for High-Durability Casting Mortar Formwork, Proceedings of the Thied Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, pp. 341~348, 1996.
- 48) 例えば, Kohno, K. et al; Use of By-Products for Glass Fiber Reinforced Concrete, Transactions of the Japan Concrete Institute, Vol. 7, pp. 25~32, 1985.
- 49) 例えば, Horii, K. et al; Mixing Methods and Properties of Silica Fume Concrete for Factory Products, Transactions of the Japan Concrete Institute, Vol. 9, pp. 9~16, 1987.
- 50) セメント協会; セメントの常識, セメント協会, pp. 3~6, 1994.
- 51) 編集委員会; コンクリート製品シリーズ, セメント・コンクリート, No. 455(1985)~No. 512 (1989).
- 52) 岡田清, 他; 改訂新版コンクリート工学ハンドブック, 朝倉書店, pp. 778~855, 1984.
- 53) 田村浩一, 他; コンクリートの歴史, 山海堂, pp. 304~306, 1984.
- 54) 23) に同じ
- 55) 編集委員会; 最新コンクリート材料・工法ハンドブック, 建設材料調査会, pp. 136~174, 1986.
- 56) 日本コンクリート工学協会; コンクリート便覧 (第二版), 技報堂出版, pp. 317~429・pp. 465~471・pp. 484~494・pp. 561~576・pp. 640~641・pp. 671~678・pp. 693~748, 1996.
- 57) 27) に同じ
- 58) 編集委員会教室WG; I型わく (その1), コンクリート工学, Vol. 24, No. 4, pp. 84~88, 1986.

- 59) 編集委員会教室WG; I型わく (その2), コンクリート工学, Vol. 24, No. 5, pp. 85~91, 1986.
- 60) 福島敏夫; 新素材開発と建築, 技報堂出版, pp. 101~116, 1993.
- 61) 21) に同じ
- 62) 23) に同じ
- 63) 土木学会, 連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用, 土木学会, pp. 1~145, 1992.
- 64) ハナント, D. J. (槇谷栄次訳); 繊維コンクリート, 森北出版, pp. 1~226, 1980.
- 65) 真嶋光保, 他; 繊維補強セメント/コンクリート複合材料, 技報堂出版, pp. 1~200, 1994.
- 66) 大濱嘉彦; コンクリート・ポリマー複合体の利用と研究・開発動向, コンクリート工学, Vol. 28, No. 4, pp. 5~17, 1990.
- 67) 35) に同じ
- 68) Ohama, Y.; HANDBOOK OF POLYMER-MODIFIED CONCRETE AND MORTARS, Noyes Publication (USA), pp. 1~21, 1995.
- 69) 土木学会; コンクリート技術の現状と示方書改訂の動向, 土木学会, pp. 1~24, 1994.
- 70) 小林茂敏; 審査証明事業にみるコンクリート製型枠の評価, セメント・コンクリート, No. 582, pp. 34~38, 1995.
- 71) 21) に同じ
- 72) 18) に同じ
- 73) 68) に同じ
- 74) 笠井芳夫, 他; セメントコンクリート用混和材料, 技術書院, pp. 187~226, 1986.
- 75) 例えば, Horii, K. et al; Effect of Steam Curing on Concrete for Products Using Low Quality Silica Fume, Transactions of the Japan Concrete Institute, Vol. 8, pp. 29~36, 1986.
- 76) 土木学会; フェロニッケルスラグ細骨材コンクリート施工指針 (案), 土木学会, pp. 1~100, 1994.
- 77) 日本電子, 他; 走査電子顕微鏡による観察の手引き, 日本電子, 他, pp. 1~35, 1990.
- 78) 土木学会; シリカフュームを用いたコンクリートの設計・施工指針 (案), 土木学会, pp. 1~233, 1995.
- 79) 堀口敬, 他; コンクリートに関する各種の摩耗試験法の特性について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 14, No. 1, pp. 685~690, 1992.
- 80) 日本コンクリート工学協会; ポリマーセメントモルタルの塩化物イオン浸透深さ試験方法 (案), ポリマーセメントモルタル試験方法規準 (案), 1987.
- 81) JIS原案; コンクリートの薬品浸せきによる耐薬品性試験方法 (案), コンクリート工学, Vol. 23, No. 3, pp. 59~62, 1985.
- 82) Neville, A. M.; Properties of Concrete Longman Scientific & Technical (USA), pp. 507~511, 1987.
- 83) 笠井芳夫, 他; コンクリートの試験方法 (下), 技術書院, pp. 192~196, 1993.
- 84) 岡田清, 他; 改訂新版コンクリート工学ハンドブック, 朝倉書店, pp. 577~586, 1984.
- 85) 笠井芳夫, 他; セメント・コンクリート用混和材料, 技術書院, pp. 165~178, 1986.
- 86) 65) に同じ
- 87) 福田博, 他; 複合材料の力学序説, 古今書院, pp. 1~28, 1989.
- 88) 大野定俊; ハイブリッド繊維補強セメントの引張挙動とモデル化, コンクリート工学論文集, Vol. 7, No. 2, pp. 79~89, 1996.
- 89) 65) に同じ
- 90) 編集委員会; 材料大事典, 産業調査会, pp. 65~85・391~410・553~562, 1985.
- 91) 日本機械学会; 先端複合材料, 技報堂出版, pp. 1~272, 1990.
- 92) 日本材料学会; 先端材料の基礎知識,
- 93) 日本複合材料学会; プラスチック基複合材料を知る事典, アグネ承風社, pp. 1~279, 1986.
- 94) 日本複合材料学会; セラミックス系複合材料を知る事典, アグネ承風社, pp. 1~330,

- 1990.
- 95) 日本複合材料学会；複合材料ハンドブック，日刊工業新聞社，pp. 1~1254, 1989.
- 96) 48) に同じ
- 97) 林富士男，他；R E Cの構造設計と材料特性の温度依存性，土木学会第50回年次学術講演会講演概要集第5部，pp. 42~43, 1995.
- 98) 魚本健人，他；各種繊維の耐アルカリ性の評価法に関する基礎研究，土木学会論文集，No. 490/V-23, pp. 167~174, 1994.
- 99) 宮川豊章，他；連続繊維補強材のアルカリ耐久性，土木学会論文集，No. 520/V-28, pp. 171~181, 1995.
- 100) 武若耕司，他；コンクリート補強用FRPロッドの耐久性に関する基礎的研究，コンクリート工学論文集，Vol. 7, No. 2, pp. 91~101, 1996.
- 101) 勝木太，他；アルカリ環境下におけるガラス繊維強化プラスチックロッドの耐久性評価，土木学会論文集，No. 544/V-32, pp. 101~107, 1996.
- 102) 安伸二，他；ポリマーディスパーションによって形成されたポリマーフィルム耐アルカリ性に関する2, 3の考察，コンクリート工学論文集，Vol. 5, No. 1, pp. 99~108, 1994.
- 103) 日本GRC工業会；GRCの物性と試験方法（GRCの試験方法），セメント・コンクリート，No. 518, pp. 57~65, 1990.
- 104) 小林一輔，他；繊維補強セメント複合板の引張特性，コンクリート工学年次講演会論文集，Vol. 6, pp. 337~340, 1984.
- 105) 48) に同じ
- 106) 97) に同じ
- 107) Kohn, K. et al; Use of Fly Ash, Blast-Furnace Slag and Condensed Silica Fume for Concrete Block Stripped Immediately After Molding, ACI Publication SP-79, pp. 1165~1176, 1983.
- 108) 即時脱型製品用コンクリートのコンシステンシーと製品の品質に及ぼす高性能減水剤の影響，セメント技術年報，Vol. 37, 525~528, 1983.
- 109) 75) に同じ
- 110) 河野清，他；低品質シリカフュームを使用した硬練りコンクリートの配合と基礎的性質，材料，Vol. 36, No. 406, pp. 710~715, 1987.
- 111) 49) に同じ
- 112) Kohn, K. et al; Use of Magnesium Calcium Silicate Admixture for Instant-Stripping Concrete Blocks, RIREM Proceedings of Admixtures for Concrete, pp. 516~523, 1990.
- 113) 芦田公伸，他；直流電流によるコンクリート中の塩分の移動，コンクリート構造物の補修工法に関するシンポジウム論文報告集，pp. 155~170, 1992.
- 114) 土木学会；PC合成床版工法設計施工指針（案），土木学会，pp. 1~116, 1987.
- 115) 土木学会；鋼コンクリートサンドイッチ構造設計指針（案），土木学会，pp. 1~100, 1992.
- 116) 廣田孝夫，他；CFRPで補強されたプレキャスト版を永久型枠として用いた梁の曲げ特性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 13, No. 2, pp. 789~794, 1991.
- 117) 石崎茂，他；FRP製永久型枠を用いたRCはりの曲げ耐力試験，土木学会第47回年次学術講演会講演概要集第1部，pp. 1190~1191, 1992.
- 118) 吉本稔，他；炭素繊維補強モルタル板を配置したRCはりの曲げ性状，土木学会第48回年次学術講演会講演概要集第5部，pp. 300~301, 1993.
- 119) 松田浩，他；PICフォームを利用したRC剛性梁のひびわれ解析，土木学会第47回年次学術講演会講演概要集第5部，pp. 768~769, 1992.



論文審査の結果の要旨

報告番号	甲 工 乙 工 第 30 号 乙 修	氏 名	堀 井 克 章
審査委員	主 査 河 野 清 副 査 平 尾 潔 副 査 水 口 裕 之		
学位論文題目 永久埋設型枠用連続繊維補強ポリマーセメントモルタルに関する研究			
審査結果の要旨 <p>本研究は、コンクリート構造物を造る際の型枠として盛んに使用されている熱帯材合板からの転換，型枠工事の合理化，RC構造物の美観や耐久性の向上などをはかるため，ポリマーセメントモルタルを用いた永久埋設型枠の開発を目的として，使用材料と配合，補強用メッシュ，養生条件の影響，躯体コンクリートとの一体性，RCはり下面へ利用など，基礎的な調査，研究を行ったものである。</p> <p>まず，永久型枠に使用するポリマーについては，スチレンアクリル系水性ポリマーディスパーションが良好で，細骨材についてはフェロニッケルスラグ砂，早強ポルトランドセメント，界面活性型消泡剤を用いるのが良いことを明らかにした。</p> <p>次に，補強用メッシュは，ガラス繊維をカチオン形PAE系ポリマーディスパーションに浸漬後乾燥処理したものをを用いると経済的で耐力，ひび割れ抵抗性，耐衝撃性の改善に有効であることを示し，養生条件の影響については，湿润養生後乾燥養生するとポリマーの造膜により，強度改善に有利で，蒸気養生や熱乾燥養生の有効性も指摘している。</p> <p>また，躯体コンクリートとの一体性についても研究し，コンクリートに砕砂や碎石を埋め込んだり，溝状や千鳥状の凹凸をつけたり，ワイヤブラシで表面を粗にすることによってかなり高い耐力を得ている。さらにRCはりの下面に永久型枠を使用すると，メッシュによるひび割れ分散効果，靱性改善され，ひび割れ幅も小となり，良好な一体性が得られることを明らかにした。</p> <p>以上，本研究は，実施工を行う場合には，取付け方法に工夫する必要があるが，永久埋設型枠用連続繊維補強ポリマーセメントモルタルに関して，極めて有用で貴重な知見を得ており，本論文は博士（工学）の学位授与に値するものと判定する。</p>			